

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Vyšetřování proudových polí při výtoku z trysky na rotující kotouč
Investigation of Flow Fields during Discharge from a Nozzle onto the Rotating
Disc

Student:

Bc. Jindřich Štefek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Drábková Sylva, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jindřich Štefek**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T043 Hydraulika a pneumatika

Téma: **Vyšetřování proudových polí při výtoku z trysky na rotující kotouč**
Investigation of Flow Fields during Discharge from a Nozzle onto the Rotating Disc

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte popis zařízení pro řezání metalografických vzorků fy Struers.
2. Proveďte základní rozbor úlohy a definici matematického modelu.
3. Definujte zjednodušenou geometrii výpočetní oblasti a výpočetní síť.
4. Modelujte stacionární úlohu proudění pro různé okrajové podmínky bez přestupu tepla.
5. Na základě poznatků proveďte numerické modelování úlohy s přestupem tepla.
6. Proveďte zhodnocení úlohy.

Seznam doporučené odborné literatury:

BOJKO, M.: 3D proudění – Ansys Fluent učební text, VŠB-TU Ostrava, 2012, 314 s. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.

BOJKO, M.: Návod do cvičení „Modelování proudění“ – Fluent, VŠB-TU Ostrava, 2008, 144 s. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.

KOZUBKOVÁ, M.: Modelování proudění tekutin Fluent, CFX, VŠB-TU Ostrava, 2008, 154 s. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.

KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M.: Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti, VŠB-TU Ostrava, 2011, 174 s. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.

BOLDIŠ, P.: Bibliografické citace podle dokumentů ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2, část 2 – Modely a příklady citací u jednotlivých typů dokumentů. Dostupné z <http://www.boldis.cz/citace/citace.html>.

Firemní literatura.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:


.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jindřich Štefek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Na Březích 604; Dolní Benešov; 747 22

Poděkování

Velice děkuji vedoucímu mé diplomové práce paní doc. Ing. Drábkové Sylvě, Ph.D. za účinnou pomoc, odbornou asistenci a cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Štefek, J. Vyšetřování proudových polí při výtoku z trysky na rotující kotouč: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2017, 81 s. Vedoucí práce: Drábková, S.

Tato práce v oblasti mechaniky tekutin se zabývá numerickým modelováním proudění kolem rotujícího kotouče na základě praktického problému metalografického řezání vzorků. Abrasivní mokré řezání je nejvhodnější metodou materiálového řezání, při níž chladicí kapalina smáčí řezací kotouč, aby nedošlo k poškození vzorku teplem v důsledku tření. Práce je zaměřena na dva hlavní přístupy k modelování. První část je zaměřena na proudění uvnitř 3D válcové dutiny, ve které se disk otáčí. Voda vstupuje do oblasti mezi stacionární stěnou a rotujícím kotoučem bočním otvorem trysky a opouští ji skrze spodní štěrbinu. Na řešení jednofázového proudění s rotující stěnou byl použit jednoduchý rotující referenční rámec. Ve druhé části byl problém definován jako výtok z trysky na rotující řezací kotouč. ANSYS Fluent multifázový model (VOF) byl aplikován při vyšetření proudových a teplotních polí a objemového podílu chladicí vody v prostoru vyplněném vzduchem.

Klíčová slova: rotující kotouč, vícefázové proudění, numerické modelování

ANOTATION OF THESIS

Štefek, J. Investigation of Flow Fields during Discharge from a Nozzle onto the Rotating Disc: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment, 2017, 81 s. Thesis head: Drábková, S.

This thesis within the area of fluid mechanics deals with the numerical modelling of the flow on a rotating disk based on the practical problem of materialographic cutting. Abrasive wet cutting is the most appropriate materialographic cutting method in which the cooling liquid flushes the wheel to avoid damaging the sample with frictional heat. The thesis is focused on two main approaches to the modelling. The first part contains the flow within a 3D cylindrical cavity in which the disk rotates. Water enters the cavity between the stationary wall and rotating disk from the side bore and leaves the cavity through the bottom gap. Single rotating reference frame was applied on the solution of the one phase flow. The second part examines the flow of the water as it is ejected from the nozzle onto the rotating disk. ANSYS Fluent's volume of fluid (VOF) multiphase model was applied to predict the flow and temperature fields and volume fraction of the cooling water in air region.

Keywords: rotating disk, volume of fluid, numerical modelling

Obsah

1	Dělení kovových materiálů kotoučovou pilou	14
1.1	Abrazivní mokré řezání.....	14
1.2	Řezné kapaliny	15
2	Popis zařízení pro řezání metalografických vzorků firmy Struers	16
2.1	Popis jednotlivých komponentů	18
3	Experimentální měření řezání vzorků na stroji Magnutom-500	24
3.1	Popis měření.....	24
3.2	Výsledky naměřené termokamerou	26
4	Numerické modelování jednofázového proudění ve zjednodušené výpočetní oblasti	28
4.1	Tvorba geometrie modelu.....	28
4.2	Tvorba sítě	31
4.3	Nastavení matematického modelu v programu Fluent	32
4.3.1	General (všeobecné).....	32
4.3.2	Výpočetní model.....	33
4.3.3	Materiály	35
4.3.4	Cell Zone Conditions	36
4.3.5	Boundary conditions	37
4.3.6	Solution Methods (metody řešení)	38
4.3.7	Solution Initialization.....	39
4.4	Interpretace výsledků	39
5	Numerické modelování dvoufázového proudění v rozšířené výpočetní oblasti bez přestupu tepla (VoF model)	45
5.1	Tvorba a popis geometrie modelu	45
5.2	Tvorba sítě	49
5.3	Nastavení modelu VOF	52
5.3.1	General	52
5.3.2	Models	52

5.3.3	Materials	56
5.3.4	Cell Zone Conditions	56
5.3.5	Nastavení primární a sekundární fáze	56
5.3.6	Interakce mezi fázemi	56
5.3.7	Boundary Conditions	57
5.3.8	Solution Methods.....	58
5.3.9	Solution initialization a patch prostředí	59
5.3.10	Run Calculation	60
5.4	Interpretace výsledků VoF modelu.....	61
6	Modelování jednofázového proudění s přestupem tepla	67
6.1	Zahřívání kotouče bez chlazení kapalinou, vyhodnoceno v čase 2,6s pro různou teplotu válečku.....	68
6.2	Zahřívání kotouče s chladicí kapalinou, vyhodnoceno v čase 2,6s pro různou teplotu válečku	74
7	Závěr	78
8	Použitá literatury	80

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Poznámka: označení, u něhož není uveden rozměr, reprezentuje obecnou proměnnou. Některá označení mají více významů a jejich význam je vysvětlen v textu.

C_D, C_v, C_μ	[1]	empirické konstanty
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	[1]	empirické konstanty
D	[m]	průměr ústí dýzy
E	[1]	empirická konstanta (stěnové funkce)
G	[m ² s ⁻³]	termická produkce turbulentní kinetické energie
$G_{b,k}$	[kg m ⁻¹ s ⁻²]	produkce turbulentní kinetické energie
G_v	[kg m ⁻¹ s ⁻²]	produkce turbulentní viskozity
G_ω	[kg m ⁻³ s ⁻²]	produkce vířivosti
H_p	[m]	výška paraboloidu
P	[W]	výkon
P_c	[Pa]	vnitřní tlak buňky na sousední výstupní plochu
Pe	[Pa]	specifikovaný výstupní tlak
P_k	[1]	rychlost vzniku turbulence
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Q_v	[m ³]	objemový průtok
Q_m	[m ³]	hmotnostní průtok
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
Re_ϕ	[1]	Reynoldsovo rotační číslo
S_k	[kg m ⁻¹ s ⁻³]	uživatelé definovaný zdrojový člen
S_ε	[kg m ⁻¹ s ⁻⁴]	uživatelé definovaný zdrojový člen
S_ω	[kg m ⁻³ s ⁻²]	uživatelé definovaný zdrojový člen
T	[K]	absolutní teplota
U_f	[m ³]	Objemový tok skrz plochu, založený na normální rychlosti
U_j	[m·s ⁻¹]	rychlost proudu z trysky
V	[m ³]	objem
D	[m]	průměr
g	[m·s ⁻²]	tíhové zrychlení

k	$[m^2 \cdot s^{-2}]$	turbulentní kinetická energie
l	$[m]$	délkové měřítko turbulence
n	$[1]$	otáčky
p	$[Pa]$	tlak
p_s	$[Pa]$	statický tlak
p_f	$[Pa]$	čelní tlak
\overline{p}	$[Pa]$	časově středovaná složka tlaku
p'	$[Pa]$	flukтуаční složka tlaku
r	$[m]$	poloměr
t	$[s]$	čas
Δt	$[s]$	časový krok
\overline{u}	$[m \cdot s^{-1}]$	časově středovaná složka rychlosti
y^*, y^+	$[1]$	bezrozměrná veličina u stěnových funkcí
α_q	$[1]$	objem buňky
α_{qf}	$[1]$	nominální hodnota q objemové frakce
ε	$[m^2 \cdot s^{-3}]$	rychlost disipace
Γ_t	$m^2 \cdot s^{-1}$	turbulentní difuzivita
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tepelné vodivosti
λ_t	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel turbulentní tepelné vodivosti
μ	$[Pa \cdot s]$	dynamická viskozita
μ_t	$[Pa \cdot s]$	dynamická turbulentní viskozita
μ_{eff}	$[Pa \cdot s]$	dynamická efektivní viskozita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická viskozita
ν_t	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kinematická turbulentní viskozita
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	$[1]$	empirické konstanty
τ	$[s]$	časová perioda
ζ		obecná proměnná
ω	$[s^{-1}]$	poměrná rychlost disipace
ω	$[m \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost

Indexy:

i	index složky veličiny
j, k, l	sumační Einsteinův index
e	týká se příčného proudu

j
x, y, z

týká se paprsku
souřadnice v kartézském systému

Úvod

S příchodem výpočetní techniky došlo k rozvoji a zavedení konstrukčních a výpočetních programů do různých oborů průmyslu. Nejdříve od jednoduchých 2D, až po složité 3D modelování objektů. Stále se zvyšující výkon a dostupnost počítačů umožnil tvorbu nových, složitějších a výkonově náročnějších programů. Tyto programy už neslouží pouze k tvorbě výkresů a modelů, ale umožňují nám provádět kompletní řešení daného problému. A to od samotné realizace modelu, až po vyhodnocení řešení grafické a numerické. Nejedná se jen o dynamické úlohy namáhání jedné součásti či celého mechanismu. Simulace dějů přestupu tepla, proudění kapalin, obtékání těles, strukturální analýzy a další, jsou dnes v konstrukčním oboru naprosto běžná věc. Tyto simulace jsou ve srovnání s fyzikálním experimentem, kdy je zapotřebí udělat složitý model s přesnou dynamickou podobností, mnohem levnější, přesnější a rychlejší, umožňují porovnání různých variant řešení.

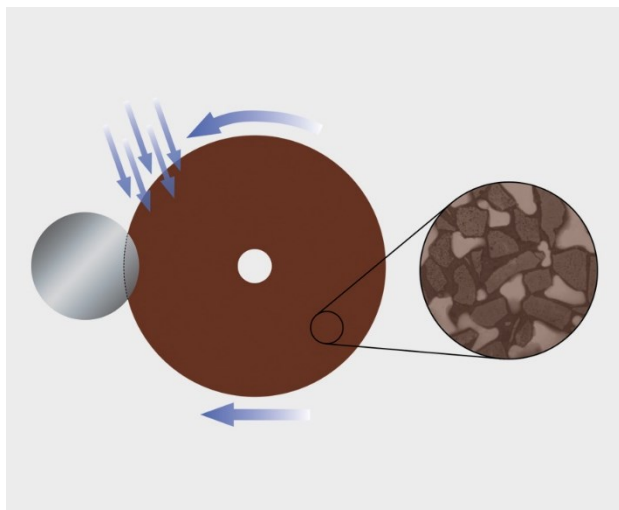
1 Dělení kovových materiálů kotoučovou pilou

Vysoce technicky náročné vynálezy jakožto automobily, letadla, kosmické rakety a v neposlední řadě počítače vytvořili širokou škálu nových těžkoobrobitelných materiálů. Tyto materiály s sebou nesou problémy při dělení a následném opracování. Dělení materiálů je často první operace v procesu výroby součástí. Nemusí se však vždy jednat pouze o výrobu součástí. Materiál dělíme za účelem zkoumání, vývoje, nebo pro běžnou kontrolu ve výrobě. Proces dělení představuje celý souhrn činností a jevů, které svým působením a účinkem působí na řezaný materiál, především však na vlastnosti a kvalitu obrobeného povrchu. Termín kvalita, z hlediska technologie výroby zahrnuje: přesnost geometrického tvaru, přesnost rozměrů, odchylku polohy a drsnosti. K těmto faktorům dále přistupuje ještě sledování fyzikálních a chemických změn vlastností materiálu, ke kterým dochází v povrchové vrstvě obrobené části, v důsledku vlastního procesu dělení. Při odběru vzorku proto nesmí dojít k mechanickému ani tepelnému ovlivnění struktury. Vzorek nesmí být plasticky deformován a teplota nesmí dosáhnout teploty případných fázových transformací. Proto je k odběru vzorku naprosto nevhodné řezání kyslíko-acetylenovým plamenem, nebo elektrickým obloukem. Perfektní metalografické dělení představuje přesnost řezu bez přehřátí nebo deformace materiálu.

1.1 Abrazivní mokré řezání

Abrazivní mokré řezání je nejvhodnější metodou materiálového řezání, neboť představuje nejmenší poškození vzorku ve vztahu k času použitému pro tento proces. Abrazivní mokré řezání používá řezací kotouč sestávající z brusiva a pojidla. Chladicí kapalina ostříkuje kolo, aby nedošlo k poškození vzorku třením, a také odstraňuje nečistoty z oblasti řezání.

Kombinace řezacího stroje, upínacích nástrojů, řezacího kotouče, chladicí kapaliny a sady parametrů včetně řezacího režimu, rychlosti posuvu a rychlosti otáčení společně určují kvalitu řezu.



obr. 1.1 *Abrazivní mokré řezání* [9], [10]

1.2 Řezné kapaliny

Pro většinu případů broušení je nutné použít chladicí kapalinu, která má tři funkce:

- odvádí část tepla vzniklého broušením
- snižuje tření v místě řezu a tím i množství vzniklého tepla
- odplavuje vzniklé třísky i odlomené části zrn kotouče

Řezné kapaliny se rozdělují na:

- Vodní roztoky
- Emulzní kapaliny
- Mastné oleje
- Zušlechtěné řezné oleje
- Rostlinné oleje (ekologicky nezávadné)
- Syntetické kapaliny

Chladicí účinek

Chladicí účinek znamená schopnost řezného média odvádět teplo z místa řezu. Každé médium, které smáčí povrch kovu má tuto schopnost. K chladicímu účinku dochází pouze za předpokladu, že mezi povrchem obrobku a médiem existuje tepelný spád.

Mazací účinek

Médium vytváří na povrchu obrobku a nástroje vrstvu, která brání přímému styku nástroje a obrobku. Jelikož při řezání dochází k velkým tlakům, nenastane zde kapalné tření. Mazací účinek zmenšuje řezné síly, spotřebu energie a zlepšuje jakost obrobeného povrchu.

Čistící účinek

Ten spočívá zejména v odvodu třísek z místa řezu. Čistící účinek je významný u použití rozbrušovacích kotoučů. Zlepší se řezivost kotouče v důsledku vyplavování zanesených pórů, zabránění slepování částic třísky a usnadnění jejich usazování.

Provozní stálost

Měřítkem řezného média je doba jeho výměny. Doba mezi výměnami média je podmíněna tím, aby se vlastnosti po celou dobu používání neměnily.

Ochranný účinek

Dané médium nesmí napadat kovy a způsobovat korozi. To je důležité z toho důvodu, aby nebylo třeba obrobek mezi jednotlivými operacemi konzervovat.

Zdravotní nezávadnost

Při práci na obráběcích strojích přichází do styku s médiem obsluha. Proto médium nesmí být zdravotně škodlivé. Nesmí obsahovat látky dráždivé sliznici a pokožku. Nesmí být jedovaté a nesmí zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem.

Přiměřené provozní náklady

Ty souvisí se spotřebou řezného média. Je nutné posoudit vliv média na proces obrábění (průběh plastických deformací v zóně řezání, opotřebení, trvanlivost,...)

2 Popis zařízení pro řezání metalografických vzorků firmy Struers

Magnutom-500 obr 2.1 je vysokokapacitní, snadno použitelný automatický řezací stroj, který zajišťuje konstantní přesné řezání s ohledem na jeho kompaktní rozměry, takže je ideální jak pro výrobní procesy, tak pro laboratoře. Extrémně velký řezací stůl, velký řezná kotouč, silný pohon motoru a efektivní chlazení zajistí přesné a efektivní řezání velkých a nadrozměrných obrobků. Inovativní design, robustní rám, naddimenzované komponenty a přímý bez řemenový vřeteník zajišťuje maximální účinnost a funkčnost.



obr. 2.1 *Magnutom-500* [11]

Magnutom-500 je navržen pro vysoký řezný výkon s ohledem na cenu a podlahovou plochu. Kompaktní plocha je jen 2,6 m². Magnutom-500 má největší řezací stůl obr 2.2 ve své třídě. Silný motor, rozměrná 1000 mm široká řezací komora v kombinaci s 2osým pohyblivým rozbrušovacím kotoučem přispívají k široké škále možností dělení. Levý dělicí stůl může být demontován k zajištění více prostoru. Pro extra dlouhé součásti je dostupné rozšíření bezpečnostního krytu.



obr. 2.2 *Řezací stůl* [12]

2.1 Popis jednotlivých komponentů

Axiowash

Axiowash zabezpečuje oplach stěn komory od veškerých nečistot nahromaděných během řezání. Je umístěný na vrchní části krytu kotouče.



obr. 2.3 Axiální oplach [13]

Oplachovací pistole

Oplachovací pistole je užitečná k odstranění nečistot v těžko dostupných prostorech. Vhodná je především k čištění upevňovacích drážek na stole. Lze ji také využít k opláchnutí nečistot z řezaného vzorku po dokončení řezání.



obr. 2.4 Oplachovací pistole

2x LED komorové osvětlení

Výkonné LED osvětlení zajistí dokonale osvětlený obrobek v uzavřené řezací komoře. Krycí panely komor jsou vybaveny průsvitným plexisklem, ale při uzavření komory není obrobek dostatečně osvětlený pro vizuální kontrolu. Proto je v komoře umístěno osvětlení.

Servisní prostor

Snadný a rychlý přístup k servisní elektronice. Nachází se na levé straně přístroje v rozvodové skříni.

Výměna řezacího kotouče

Jednoduchá a rychlá výměna řezacího kotouče je zajištěna maticí a přírubou.



obr. 2.5 Výměna kotouče

Ovládací panel

Ovládací panel s displejem pro jednoduché nastavení metody řezání, otáček řezacího kotouče, typu kotouče, typu posuvu a jiného nastavení.

Po spuštění procesu řezání se panel s nastavením přepne do režimu “proces řezání”, na kterém je zobrazena aktuální rychlost posuvu, délka řezané plochy a již uražená vzdálenost, zatížení motoru a doba zbývající k dokončení operace.



obr. 2.6 Ovládací panel

Joystick

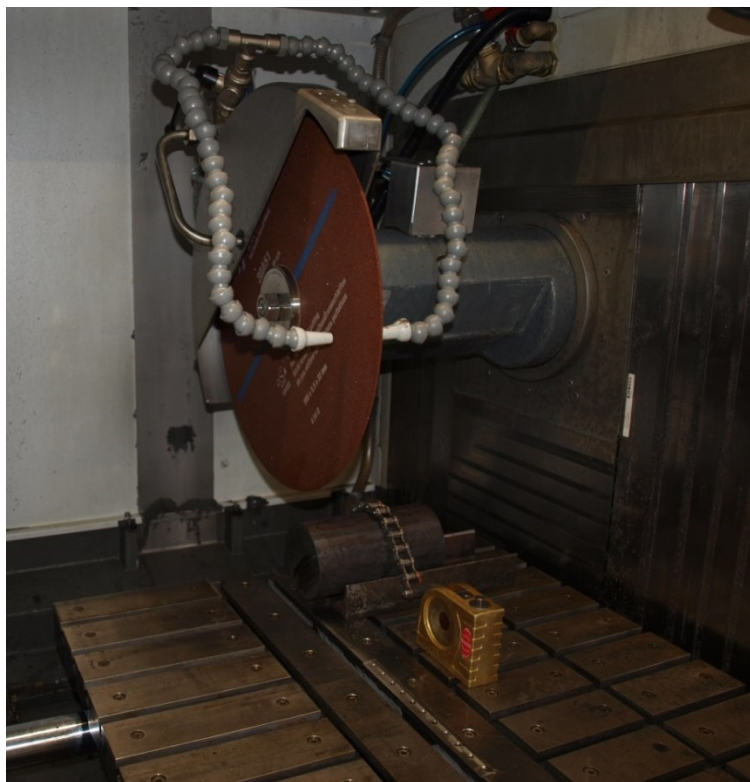
Uživatelsky jednoduše ovladatelný joystick na ovládacím panelu slouží k manipulaci s kotoučem a celým ramenem.

Manipulace ramene bez zavřeného krytu

Z bezpečnostních důvodů lze s řezacím mechanismem manipulovat jen při zavřených krytech komory. Někdy je ale třeba posouvat se zařízením i při otevřených krytech. Například chceme-li provádět řez v přesně námi určeném místě. K tomuto účelu je magnuton-500 vybaven bezpečnostním tlačítkem. K tomu, abychom mohli celým řezným mechanismem posouvat při otevřených krytech komory je zapotřebí, aby levá ruka nepřetržitě držela stisknuté tlačítko a pravá ruka ovládala joystick.

Mimořádný chladicí systém řezného kotouče

Velký rozměr dělicího kotouče a velké vzorky potřebují mimořádné chlazení. Chladicí trysky na obou stranách krytu řezného kotouče zajistí dostatečný přísun chladicí kapaliny k obrobku a místu řezání. K dodatečnému chlazení slouží dvě nastavitelné trysky.



obr. 2.7 Chlazení kotouče

Laser

Laserový ukazatel místa řezu je užitečný pomocník při ustavení vzorku pro řez v předem definovaném místě.

Signalizační světlo

Optická signalizace procesu zařízení. Červené světlo – proces nedokončen z důvodu poruchy. Oranžové světlo – Proces dokončen. Zelené světlo – Probíhá proces řezání.

Odmlžovač

Při řezání dochází k rozptýlení a rozvíření kapiček chladicí kapaliny v celém prostoru komory. Odmlžovač tyto redukuje a zabrání jejich úniku po dokončení řezání a otevření krytu komory.

Coolimant-200 filtrační jednotka

Magnutom-500 disponuje samostatnou externí filtrační nádrží o objemu 200 l. Jako filtrační materiál je použitý filtrační papír, který je navinut v roli a postupně odvalován. Role obsahuje 500 m filtračního papíru. Dostupná je taky verze se statickým filtrem.



obr. 2.8 Filtrační a zároveň chladicí systém [14]

Upínky a svorky

Různé tvary obrobků si žádají diferenciální možnosti upevnění. Firma Struers nabízí širokou škálu rychloupínek, svěráků a různých podpěrných bloků. Různé kombinace těchto mechanismů zajistí perfektní upnutí obrobku na řezném stole.

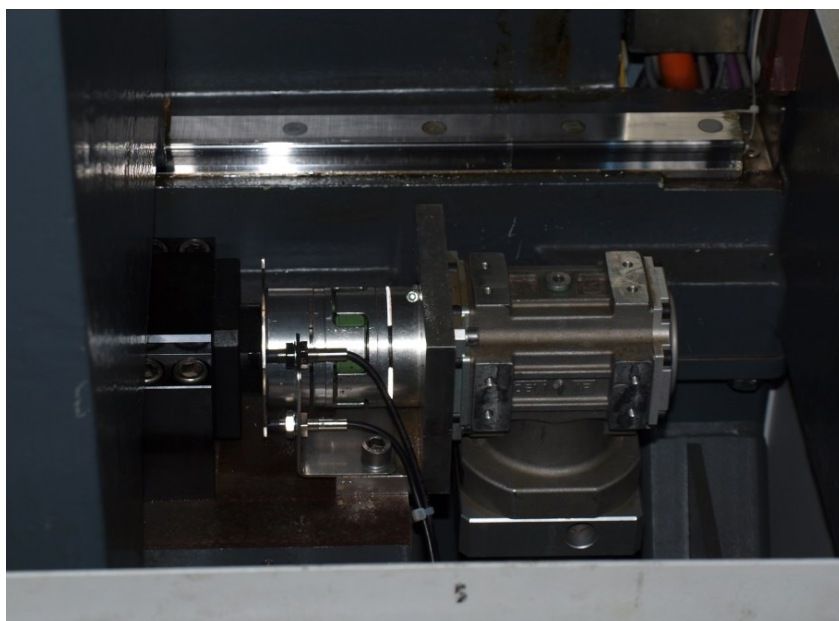


obr. 2.9 Upínka

Pohon a pohybové šrouby

Dostatečný výkon k řezání i těch nejtvrděších materiálů zajišťuje elektromotor s výkonem až $P = 18 \text{ kW}$. Motor i pohybové ústrojí je uloženo v pravé části stroje v robustním rámu. Uložení musí být dostatečně tuhé, aby při řezání ve vysokých otáčkách kotouč nevibroval

K zajištění posuvu ve dvou směrech slouží dva vodící šrouby. Každý jednotlivý šroub má vlastní pohon se snímačem polohy a zpětnou vazbou. Chceme-li vyvodit pohyb kotouče ve vertikálním směru, dojde pouze k naklápění motoru v uložení. Pokud chceme pohybovat kotoučem v horizontálním směru, posouvá se celé uložení s motorem.



obr. 2.10 *Pohon posuvu*

3 Experimentální měření řezání vzorků na stroji Magnutom-500

Firma Struers, která poskytla téma diplomové práce, mě nechala provést několik cvičných pokusů dělení materiálů za reálných podmínek. Za účelem vypracování pátého bodu osnovy zadání diplomové práce jsme realizovali s Ing. Davidem Šeděnkou měření termokamerou Fluke TI 55, 320x240 pixelů (měřících bodů) na stroji Magnutom-500. Jednalo se o měření teploty kotouče v místě řezu. Stroj, na kterém jsme prováděli měření, byl prototyp verze Magnutom-500.

3.1 Popis měření

Testovaný vzorek byla kruhová tyč průměru $d = 100$ mm. Jelikož jsem neměl k dispozici voděodolný kryt na termokameru, nemohl jsem ji umístit do prostoru řezné komory. Termokamerou jsem tedy snímal průběh řezání zpoza ochranného krytu. I přesto, že ochranné kryty jsou průhledné, nedokážeme přes ně snímat teplotu, jelikož odráží infračervené spektrum. Problém jsem vyřešil sejmutím madla z bočního krytu. Otvor po madlu byl dostatečně velký k tomu, abych mohl měřit a v dostatečné vzdálenosti od místa řezu testovaného vzorku, takže řezná kapalina otvorem nestříkala ven. Přes čočku termokamery jsem pro jistotu přelepil ochrannou folii, aby i při malém kontaktu řezné kapaliny s čočkou nedošlo k poškození termokamery.



obr. 3.1 Snímání teploty termokamerou

Tyč jsem upnul na pravý stůl tak, aby delší částí směřovala od termokamery, a to z důvodu lepší dostupnosti snímání teploty. Protože pravý stůl není posuvný, po každém řezání jsem tyč ručně posunul. Všechna měření jsem prováděl za konstantních otáček $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Řezané vzorky měly tloušťku 2 až 3 mm. Posuv do materiálu byl pokaždé zezadu dopředu. Termokamerou jsem sledoval a zaznamenával teplotní nárůst při zvětšujícím se záběru materiálu. Cílem bylo zmapovat nárůst teploty až do doby, kdy dojde k natavení materiálu v místě řezu.

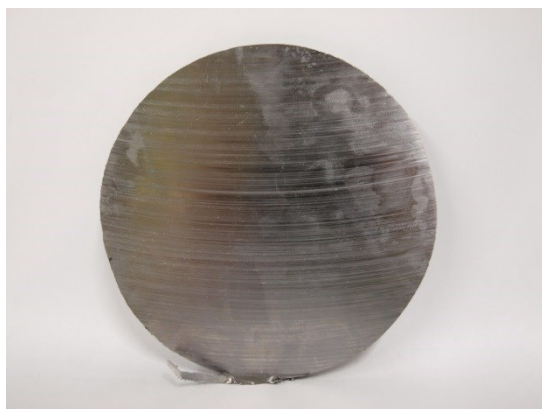


obr. 3.2 *Průběh řezání bez natavení*

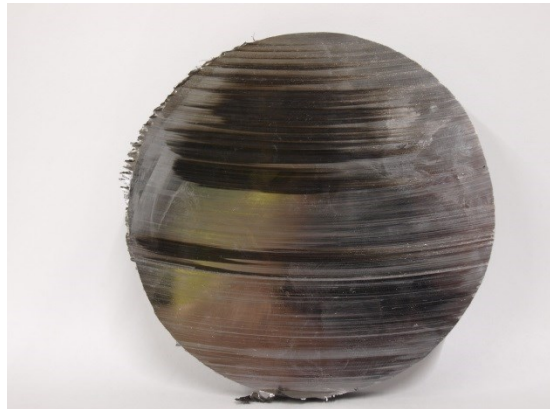


obr. 3.3 *Průběh řezání s natavením*

Aby došlo k natavení, bylo zapotřebí vysokého řezného přísuvu. Začínali jsme měřit s přísuvem $0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Po každém dokončeném řezání jsme zvýšili rychlost přísuvu do materiálu o $0,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Se zvyšujícím se přísuvem narůstá zatížení na elektromotoru pohánějící řezný kotouč. Aby nedošlo k přetížení a poškození elektromotoru je Magnutom-500 vybavený automatickou pojistkou. Ta při překročení maximálního dovoleného zatížení elektromotoru automaticky sníží přísuv. Dojde-li však v průběhu řezání vlivem velkého přísuvu k natavení materiálu, materiál zůstává natavený i po snížení přísuvu v průběhu řezání.



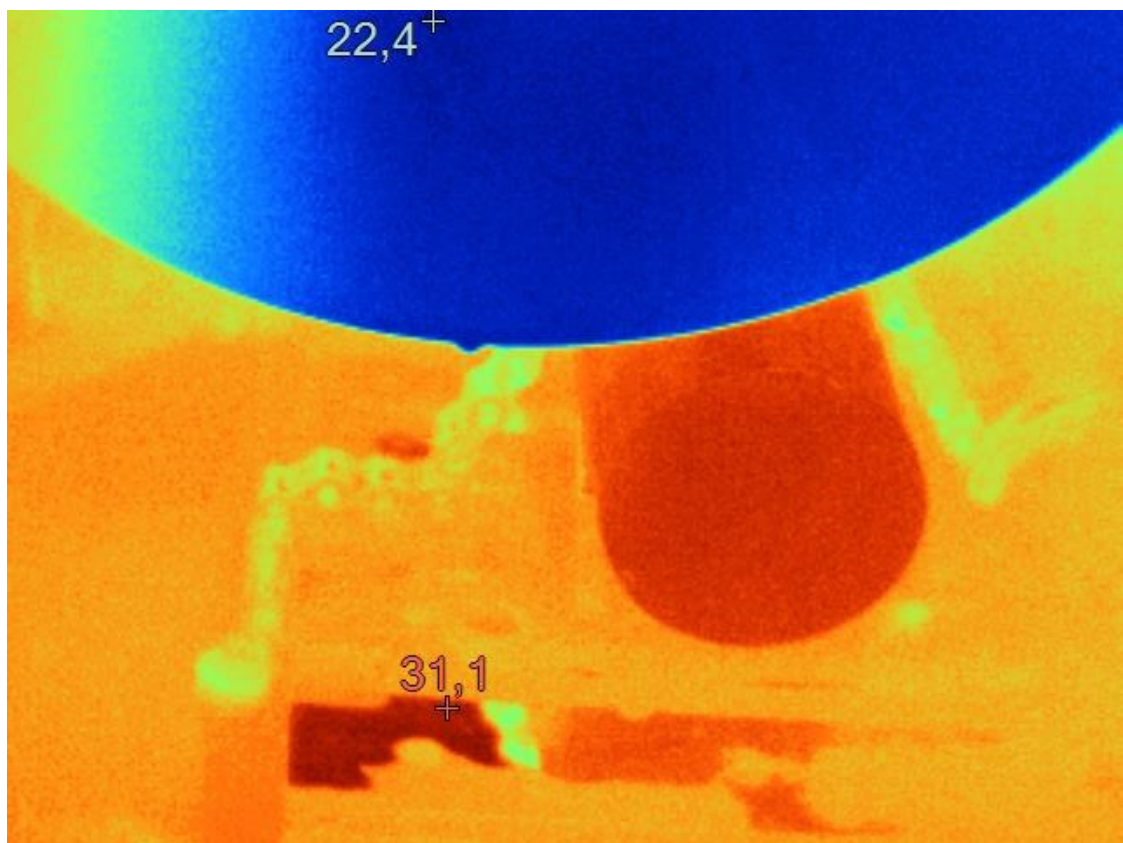
obr. 3.4 *Dobrý vzorek*



obr. 3.5 *Spálený vzorek*

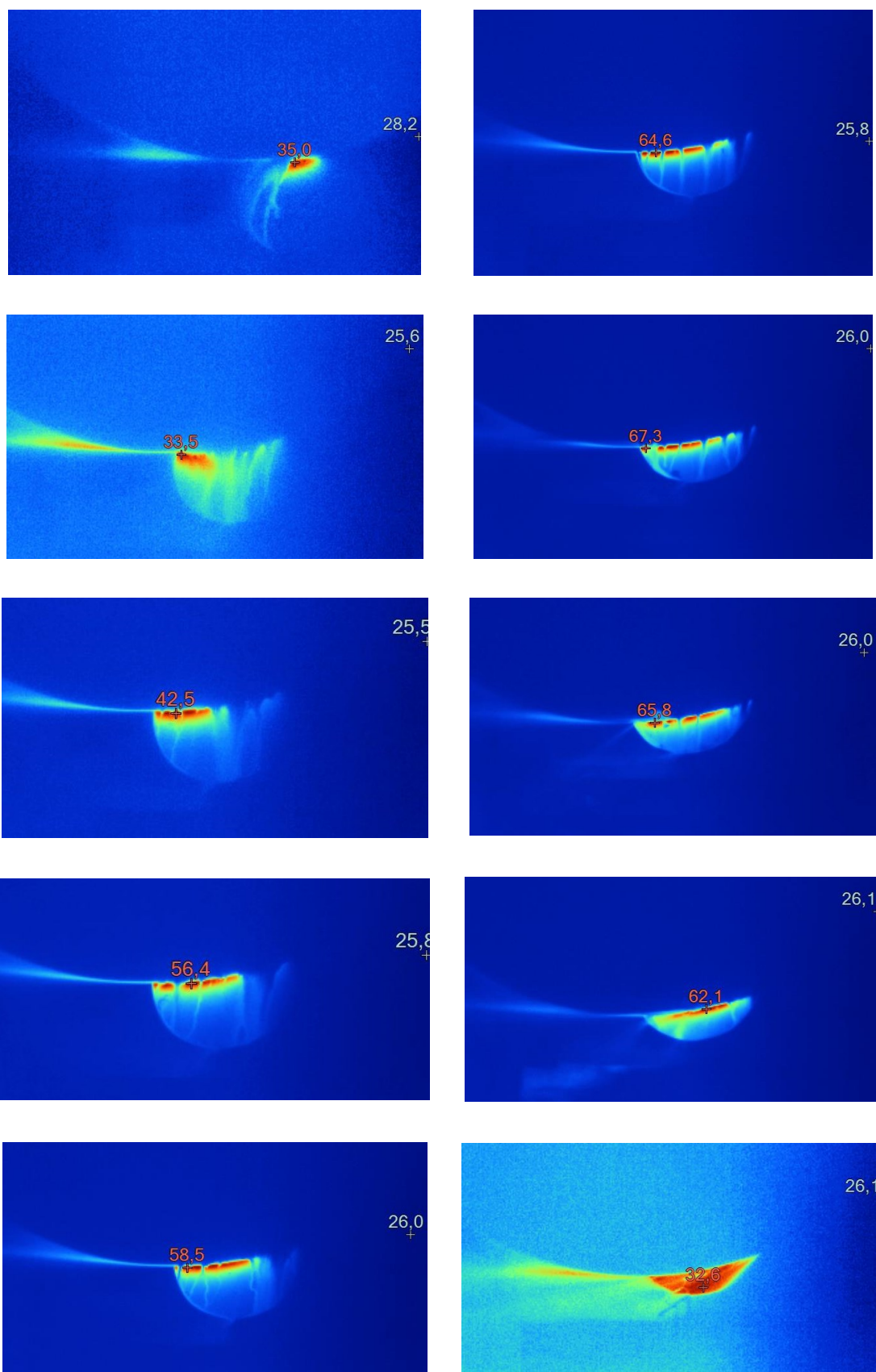
3.2 Výsledky naměřené termokamerou

I přes všechny složitosti měření se podařilo zaznamenat teplotu při řezání. Měření teploty značně komplikovalo velké množství odstříkující chladicí kapaliny od kotouče a krytu kotouče. Problém také představoval kus řezaného materiálu, který zakrýval kotouč během řezání, proto nebylo možné změřit přesnou teplotu v místě dotyku kotouče s materiálem. Z měření je patrné, že čím větší je záběr kotouče do materiálu, tím větší je styčná třecí plocha a tím je i vyšší teplota. Naměřená teplota řezného kotouče se mimo oblast řezu v průběhu řezání neměnila. To mohlo být z důvodu dostatečného chlazení kotouče nebo nepřesnosti měření v důsledku vrstvy kapaliny na kotouči. Teplota kapaliny se v průběhu testování výrazně nezvyšovala.



obr. 3.6 Snímek kotouče a řezaného vzorku před řezáním

Obr 3.7 níže znázorňují posloupnost řezání vzorku v čase. Můžeme vidět, že teplota v místě řezu narůstá. Nejvyšší hodnoty nabude při největším styku kotouče s materiálem. Poté teplota začne klesat. Zvýšené teplotní pole za materiálem je buď ohřátá kapalina, nebo odlétající jiskry. To se mi nepodařilo zjistit.



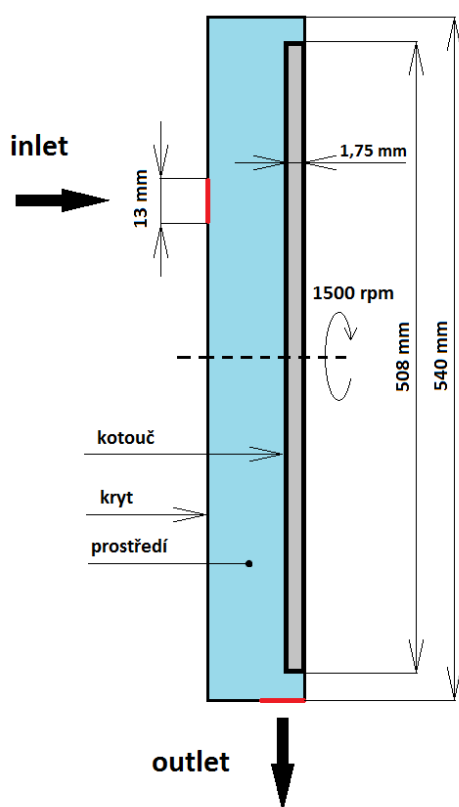
obr. 3.7 Posloupnost řezání zaznamenaná termokamerou

4 Numerické modelování jednofázového proudění ve zjednodušené výpočetní oblasti

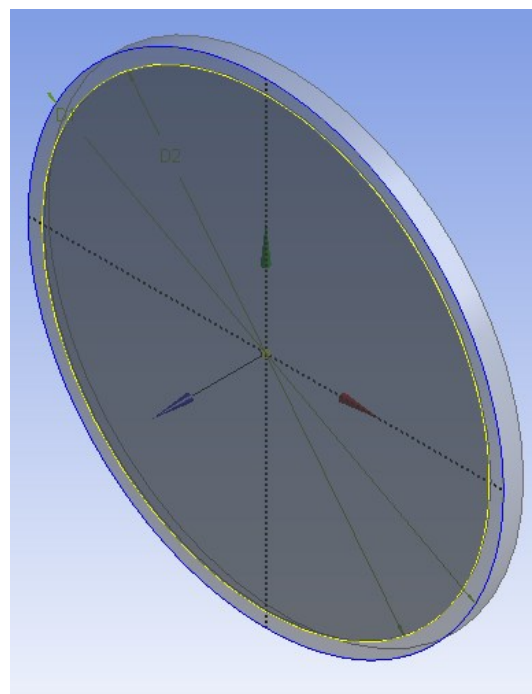
Zjednodušený model představuje rotaci kotouče v uzavřené válcové oblasti naplněné vodou. Úloha je definována jako 3D, stacionární, turbulentní proudění jedné fáze (vody) bez přenosu tepla. Zjednodušené řešení pojednává pouze o proudění kapaliny kolem disku rotujícího konstantními otáčkami a to v idealizovaném modelu. Sestava kotouče zde tedy popisuje řezání kotoučem obklopeného vodou bez působení vzduchu. Předmětem bylo vyšetření rychlostního a tlakového pole kolem kotouče. Vícefázové proudění bude zahrnuto až v dalším bodě.

4.1 Tvorba geometrie modelu

Při tvorbě geometrie jsem vycházel z definice válcové oblasti o průměru 540 mm, ve které bude kotouč rotovat. Do ní jsem vnořil disk o průměru 508 mm a tloušťce 1,75 mm. Průnik obou objemů jsem řešil použitím funkce Boolean obr. 4.3.

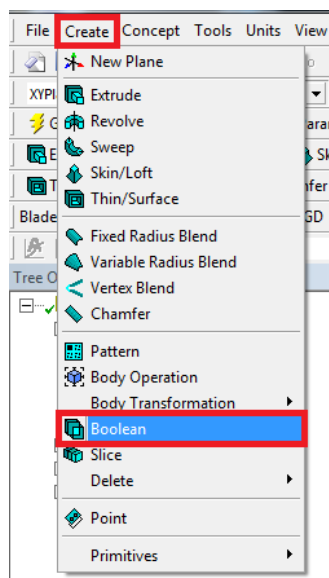


obr. 4.1 Zjednodušené schéma

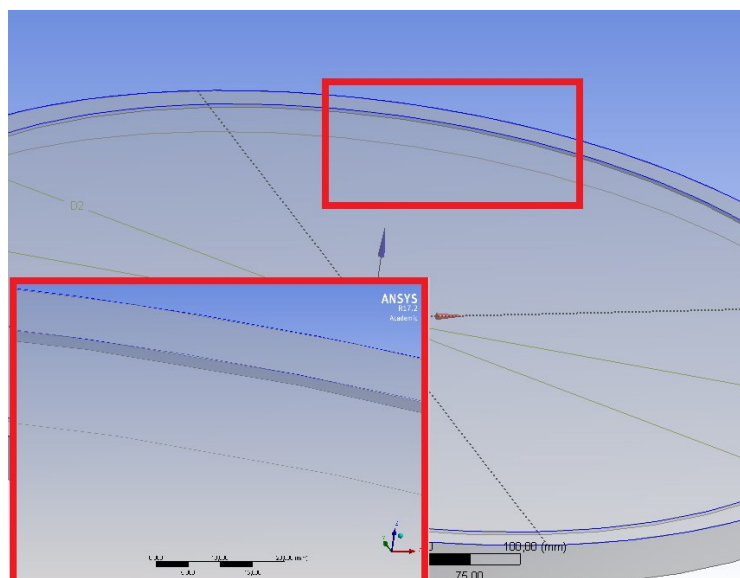


obr. 4.2 Prostředí s kotoučem

Boolean operace pak zajistí jejich správné oddělení a vytvoření dvou nezávislých prvků, se kterými lze dále pracovat. Především se ale jedná o nejrychlejší vytvoření více prvkové geometrie.

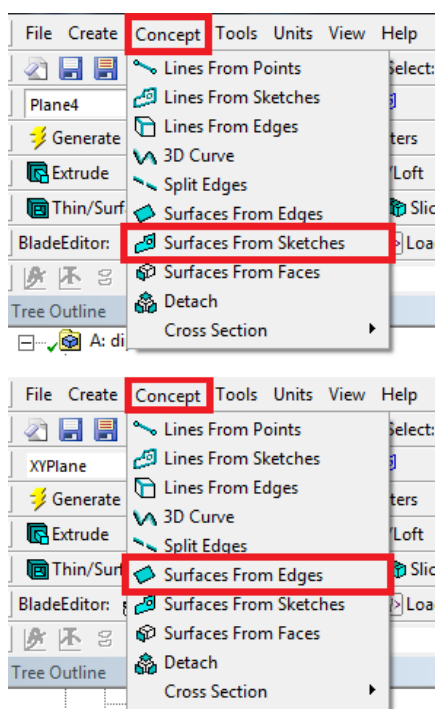


obr. 4.3 Boolean

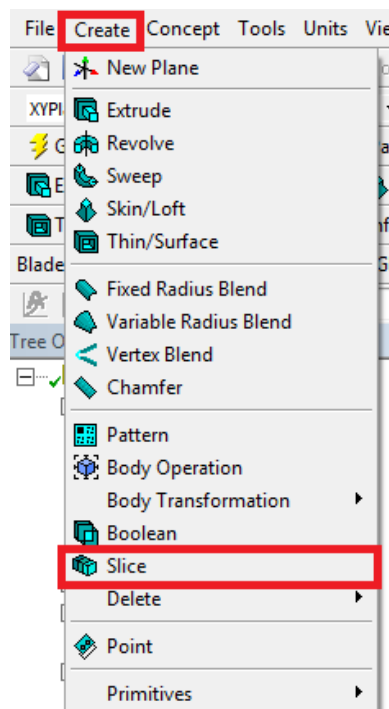


obr. 4.4 Výpočetní oblast po Boolean operaci

Vstup (Inlet) média do prostředí jsem vymodeloval jako Surface Body. Jeho poloha odpovídá přívodu chladící vody o průměru 13 mm. Na rozdíl od Solid partu je Surface Body pouze plocha s nulovou tloušťkou. Pokud bych vytvořil Inlet jako Solid Body vysunuté z prostředí (lze si představit jako potrubí), došlo by k ovlivnění rotace kapaliny a zkreslení výpočtu. K jejímu vytvoření jsem použil funkci Surface from sketches.

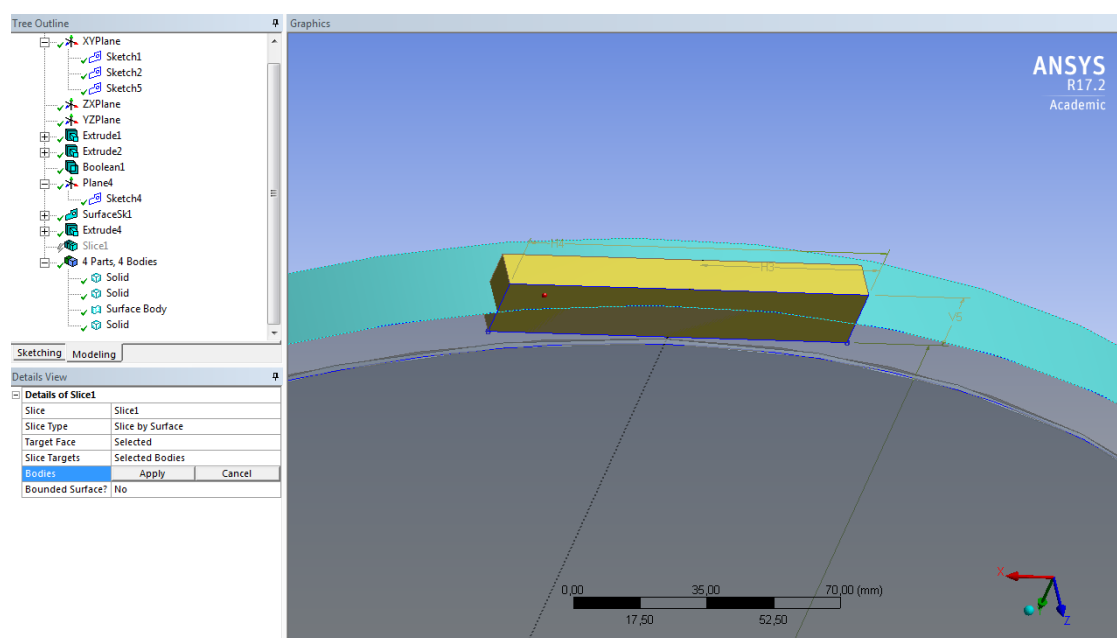


obr. 4.5 Surface

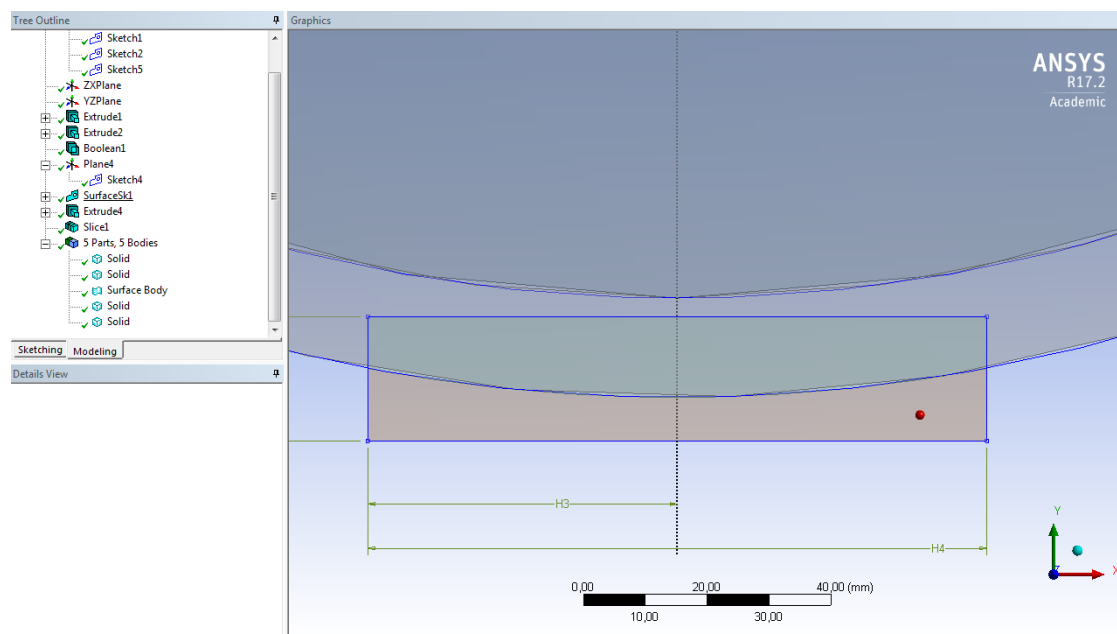


obr. 4.6 Slice

K vytvoření otvoru pro výstup (Outlet) média z prostředí, jsem musel vymodelovat kvádr, prostupující místem, kde bude otvor pro výstup. Kvádr jsem rozdělil na dvě části tak, že modrá plocha na obr. 4.7 znázorňuje plochu dělicí. K tomu jsem použil funkci slice obr. 4.6 typu surface. Po rozdělení kvádru na dva díly obr. 4.8 byl jeden z nich potlačen pomocí příkazu suppress. K vytvoření plochy jsem pak použil funkci surface from edges obr. 4.5. Vybral jsem hrany promítnuté do obvodu válcové plochy vymezující řešenou oblast. Vytvořil jsem plochu pro výstup (Outlet). Výsledná geometrie úlohy obsahuje dva objemy (prostředí, kotouč) a definovaný vstup a výstup z oblasti pomocí surface body (inlet, outlet).



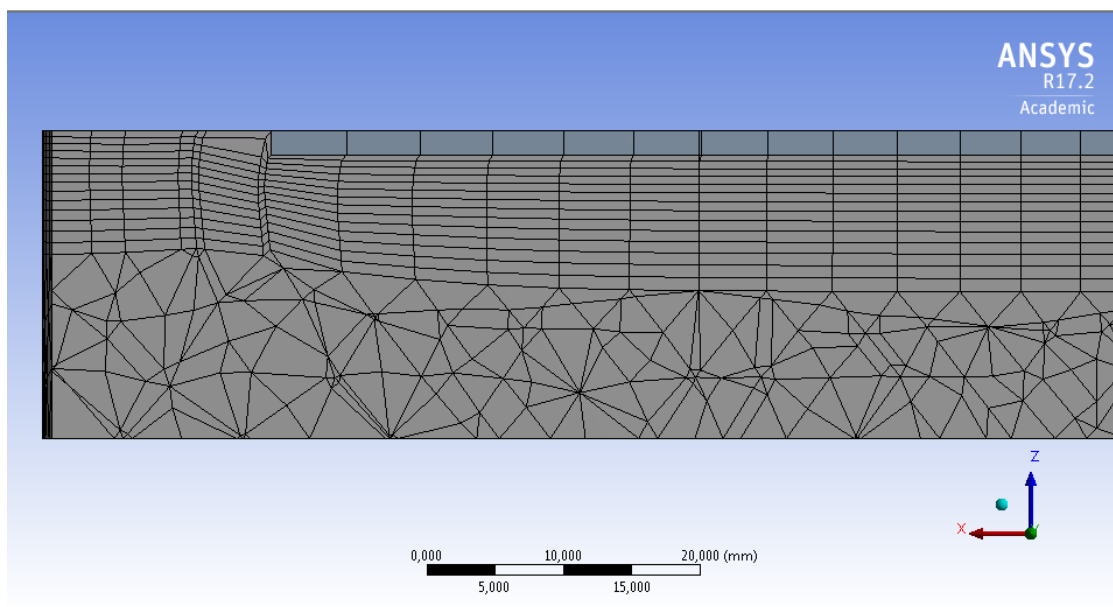
obr. 4.7 Geometrie, dělicí plocha



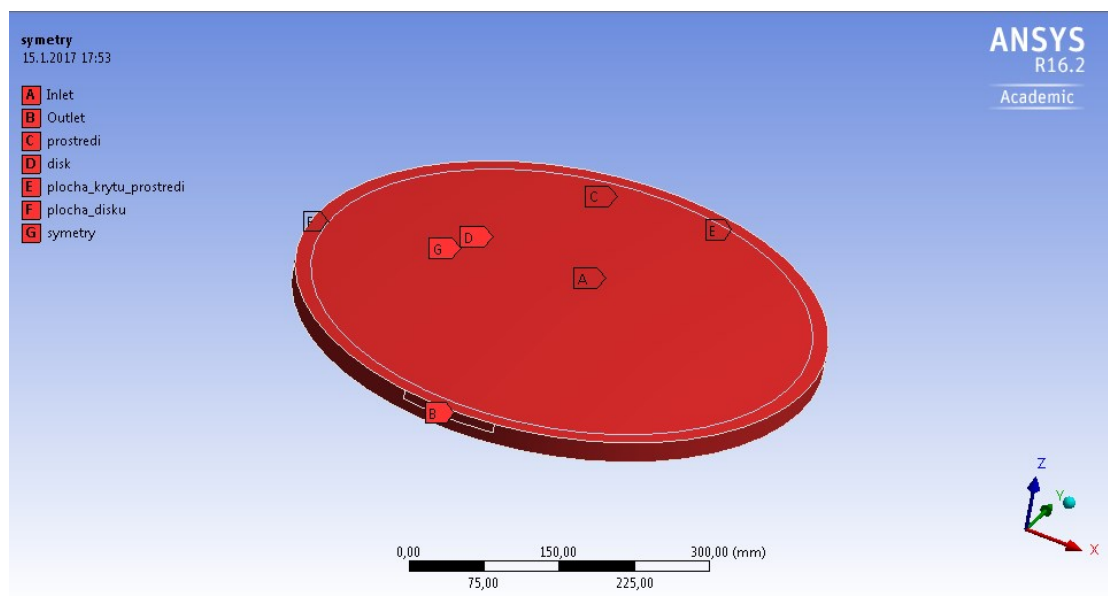
obr. 4.8 Rozdělení pomocí slice

4.2 Tvorba sítě

Tvorba sítě ovlivňuje správnost výsledků při simulaci výpočtu. Je třeba vytvořit síť s dostatečným počtem elementů. Tvary elementů taktéž ovlivňují správnost výpočtu. V mém případě jsme zvolili typ elementu *tetrahedrons* (čtyřstěn). Jelikož k rotaci kapaliny bude docházet především na stěně disku, přidal jsem mezi plochu disku a prostředí mezní vrstvu. Ta zajistí zhuštění sítě v oblasti přechodu mezi kotoučem a okolím obr. 4.9.



obr. 4.9 Mezní vrstva a síť



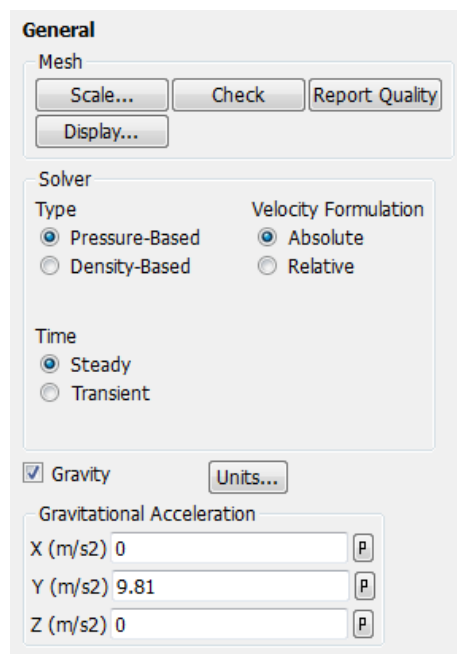
obr. 4.10 Pojmenování jednotlivých entit

4.3 Nastavení matematického modelu v programu Fluent

Připravená síť byla importována do řešiče Fluent. Provedl jsem kontrolu sítě a nastavil jednotlivé parametry k řešení.

4.3.1 General (všeobecné)

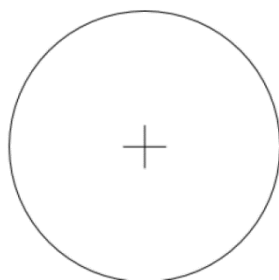
Zvolil jsem základní nastavení řešiče dle obr. 4.11.



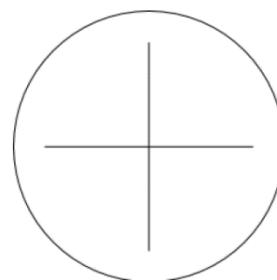
obr. 4.11 Všeobecné nastavení

Rychlostní formulace

Formulace **absolutní** rychlosti je upřednostňována v aplikacích, kde kapalina neproudí v celé oblasti (například ventilátor ve velké místnosti). **Relativní** rychlostní formulace je vhodná, když se většina tekutiny v doméně pohybuje, jako u velkého oběžného kola v mísící nádrži, viz obr 4.12 a 4.13.



obr. 4.12 Malé oběžné kolo (A)



obr. 4.13 Velké oběžné kolo (B)

V případě A se očekává, že vlivem rotace kola se bude otáčet kapalina pouze v jeho blízkosti a s rostoucí vzdáleností od kola bude vliv rotace slábnout. Proto je doporučeno řešení pomocí formulace absolutní rychlosti. V případě B se předpokládá, že se otáčení disku ovlivní rozložení rychlostního pole v celé oblasti. Proto je vhodná formulace relativní rychlosti.

V mém případě kotouč dosahuje téměř stejného průměru jako prostředí, v němž rotuje kapalina. Předpokládal jsem ale, že největší zavíření kapaliny bude pouze v bezprostřední blízkosti kotouče. Zvolil jsem tedy **absolutní** rychlostní formulaci.

Pro rychlostní vstupy, tlakové vstupy, vstupy pro hmotnostní průtok a stěny můžu zadat rychlost buď v absolutním, nebo v relativním rámci bez ohledu na to, zda při výpočtu použiji formulaci absolutní nebo relativní rychlosti.

Časově závislá, nezávislá úloha

V tomto případě, kdy jsem řešil zjednodušenou úlohu, jsem ji zvolil jako **časově nezávislou** tzv. Steady (stabilní, stálou). Časově závislou úlohu řeším až při použití vícefázového VoF modelu v nadcházející kapitole. Vysvětlení nastavení této problematiky se budu věnovat tam.

Gravitační zrychlení

Gravitaci jsem nastavil na hodnotu $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Gravitační zrychlení při řešení zjednodušeného modelu ovlivňuje výpočet jen velice málo. Hlavní kritéria jsou rotace kapaliny a objemový průtok vstupující do prostředí kapaliny ze vstupu.

4.3.2 Výpočetní model

Proudění nestlačitelné tekutiny lze obecně popsat rovnicí kontinuity a Navier - Stokesovými rovnicemi.

V případě nestacionárního proudění lze rovnici kontinuity, vyjadřující zákon zachování hmoty, definovat ve tvaru:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

a Navier-Stokesovy rovnice vyjadřující změnu hybnosti:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (4.4)$$

kde u , v a w jsou složky rychlosti, p je tlak a $f_{x,y,z}$ označuje složky vnější objemové síly.

K ověření režimu proudění jsem vypočetl rotační Reynoldsovo číslo Re_ϕ dle vztahu

$$Re_\phi = \frac{\Omega r^2}{\nu} = \frac{\frac{1500}{60} 0,254^2}{1 \cdot 10^{-6}} = 1612900 \quad (4.5)$$

kde Ω je rychlost rotace, r je poloměr kotouče, ν je kinematická viskozita vody

Jeho hodnota je cca $1,6 \cdot 10^6$, předpokládal jsem tedy turbulentní proudění. Pro většinu inženýrských úloh turbulentního proudění jsou nejpoužívanějším nástrojem statistické modely turbulence, založené na definici časově středovaných veličin turbulentního proudění a na následující proceduře časového středování bilančních rovnic (RANS- Reynolds Averaged Navier-Stokes). Všechny výše uvedené modely využívají Boussinesqovu hypotézu pro modelování turbulentních (Reynoldsových) smykových napětí, které se objeví v Navier-Stokesových rovnic po jejich středování.

Zvolil jsem turbulentní výpočetní model k -omega typu SST (Shear-Stress Transport). Standardní $k - \omega$ model je empirický model založený na definici transportní rovnice pro kinetickou turbulentní energii a k a specifickou (poměrnou)

rychlost disipace $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - Y_k + S_k \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + P_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (4.7)$$

kde P_k je produkce turbulentní kinetické energie v důsledku gradientu střední rychlosti,

P_ω produkce ω

Γ_k, Γ_ω efektivní difuzivita k , resp. ω

Y_k, Y_ω disipace k , resp. ω v důsledku turbulence

S_k, S_ω uživatelem definovaný zdrojový člen k , resp. ω .

Efektivní difuzivita a dynamická turbulentní viskozita jsou definovány vztahy

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad \mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (4.8)$$

Pomocí koeficientu α^* je tlumena turbulentní viskozita v případě nízkých Re čísel. Definice jednotlivých členů rovnice je podrobně popsána v [7].

Jeho modifikace v podobě Shear Stress Transport (SST) modelu byla formulována s cílem upřesnit model v blízkosti stěny s nízkým Reynoldsovým číslem. Je spojením modifikovaného $k-\varepsilon$ modelu a $k-\omega$ modelu. Model $k-\omega$ je aktivován v blízkosti stěny, model $k-\varepsilon$ v oblastech vzdálených od stěny. Tato úprava zvyhodňuje SST $k-\omega$ model vůči standardnímu $k-\omega$ modelu a standardnímu $k-\varepsilon$ modelu. Model nezahrnuje složité nelineární funkce tlumení požadované pro $k-\varepsilon$ model a je tedy přesnější a robustnější. Model $k-\varepsilon$ s nízkou hodnotou Reynoldsova čísla by obvykle vyžadoval rozlišení $y^+ < 0,2$ blízko stěny, zatímco $k-\omega$ model s nízkým Reynoldsovým číslem $y^+ < 2$. V průmyslových aplikacích není ani ve většině aplikací zaručeno $y^+ < 2$, a proto byl pro tyto modely $k-\omega$ vyvinut nový přístup k výpočtu v blízkosti stěny (near wall treatment). Umožňuje hladký posun od číselné formy s nízkým Reynoldsovým vzorem až po funkci formulace stěn. Díky těmto vlastnostem je model SST $k-\omega$ přesnější a spolehlivější pro širší třídu průtoků (například nepříznivé tlakové spádové gradienty, vzduchové polštáře, rázové vlny) než standardní a BSL modely. Tento model je doporučován pro úlohy spojené s rotací kapaliny.

4.3.3 Materiály

Řešení zjednodušeného modelu představuje rotující kotouč v uzavřeném prostředí kapaliny. Geometrie se skládá jen z kotouče a prostředí. Prostředí je

v tomto případě kapalina, water-liquid (voda). Řezný kotouč je pevný materiál, steel (ocel). Oba materiály bylo třeba přidat z databáze materiálů.

4.3.4 Cell Zone Conditions

Cell zone podmínky a okrajové podmínky určují proměnné toku a tepla na hranicích fyzického modelu. Jsou proto kritickou součástí simulací ANSYS Fluentu a je důležité, abych je správně specifikoval. Cell zone podmínky umožňují definovat v dané oblasti tekutiny, pevné látky, porézní zóny, tj. základní vlastnosti daného prostředí. Pro danou úlohu jsem definoval:

disk – solid

"Pevná" zóna je skupina buněk, pro které je vyřešen pouze problém s vedením tepla. Rovnice průtoku se neřeší. Materiál, který je zadán jako pevná látka, může být ve skutečnosti tekutinou, ale předpokládá se, že nedochází k žádné konvekci. Jediný požadovaný vstup pro pevnou zónu je typ pevného materiálu. Musím uvést, jaký materiál pevná zóna obsahuje, aby byly použity příslušné vlastnosti materiálu. Volitelné vstupy umožňují nastavit objemové množství tepla (zdroj tepla) nebo pevnou hodnotu teploty. Můžu také definovat pohyb pro pevnou zónu. Pokud jsou rovné periodické hranice přilehlé k pevné zóně, musím určit osu otáčení.

V mém případě jsem nastavil disk jako solid steel (ocel). Rotaci disku jsem nezadával, disk jsem nechal jako stacionární. Rotaci kapaliny jsem řešil pomocí možnosti Frame Motion v nastavení prostředí fluid, viz popis níže.

prostředí – fluid

Zóna tekutiny (fluid zone) je skupina buněk, pro které jsou řešeny všechny aktivní rovnice. Jediný požadovaný vstup pro kapalinovou zónu je typ tekutého materiálu. Musím uvést, jaký materiál obsahuje kapalina, aby byly použity příslušné vlastnosti materiálu.

Volitelné vstupy umožňují nastavit zdroje nebo fixní hodnoty hmotnosti, hybnosti, tepla (teploty), turbulence, a dalších skalárních veličin. Můžu také definovat pohyb kapaliny. Pokud jsou v oblasti fluidní zóny rotačně periodické hranice, musím určit osu otáčení.

Rotující referenční rámec (frame motion) jsem definoval pro zónu kapaliny. Zatřžením možnosti Frame Motion se zpřístupní možnost nastavení rychlosti rotace. Definuji otáčky $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Směr osy rotace nastavím v záložce Rotation-Axis Direction jako osu z. Kladnou hodnotou 1 a zápornou hodnotou -1 měním směr osy rotace.

4.3.5 Boundary conditions

Hraniční podmínky (boundary conditions) umožňují definovat podmínky na vstupu do oblasti (např. rychlost, průtok nebo tlak), výstupu z oblasti (nejčastěji tlak), dále podmínky symetrie, periodické podmínky, stěny, atd. Nebudu vyjmenovávat a popisovat všechny možnosti nastavení jednotlivých typů okrajových podmínek. Zaměřím se jen na popis podmínek, které jsem ve výpočtu použil a které bylo nezbytné zmínit a specifikovat.

Inlet

Inlet lze zadat třemi různými způsoby. Tlakovou podmínkou, rychlostní podmínkou a podmínkou hmotnostního průtoku. Ze specifikace stroje Magnuton-500 jsem věděl, že průtok kapaliny na kotouč činí $Q_v = 57 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Nejjednodušším způsobem zadání je proto hmotnostní průtoková podmínka. Jelikož je složení řezné kapaliny z 95% voda, předpokládal jsem stejnou hmotnost řezné kapaliny jako vody. Po přepočtu průtoku z $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ na $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ a za předpokladu symetrického rozdělení průtoku na polovinu jsem zadal hodnotu hmotnostního průtoku $0,475 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$Q_m = \frac{Q_v}{2} = \frac{\left(\frac{57}{60}\right)}{2} = 0,475 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.9)$$

Směr proudění kapaliny jsem podle souřadnicového systému zvolil v ose z hodnotou 1. Turbulenci jsem specifikoval intenzitou turbulence a hydraulickým průměrem. Intenzitu turbulence jsem nastavil na hodnotu 5% a hydraulický průměr je průměr vstupu kapaliny, což je 13 mm.

Outlet

Výstup jsem nastavil jako pressure-outlet. Kromě metody specifikace zpětného proudění jsem neměnil žádné jiné hodnoty. Tuto specifikaci jsem nastavil jako From Neighboring Cell. Tato možnost znamená, že ANSYS Fluent určuje směr zpětného toku pomocí směru průtoku ve vrstvě buňky přiléhající k výstupu tlaku (pressure outlet).

Interior disk a interior prostředí

Obě hodnoty interioru jsem již specifikoval v záložce Cell Zone Conditions. Možnost další specifikace se v tomto případě nenaskytuje.

Symetry disk a symetry prostředí

Tyto plochy představují plochy symetrie geometrie. Proto jsem nastavil obě plochy jako typ symmetry (symetrie).

Rozhraní disk prostředí shadow

Rozhraní shadow je zóna, kterou Fluent vygeneruje automaticky. Jedná se o plochu mezi dvěma fázemi, což v tomto případě představuje plocha disku zasahující do prostředí kapaliny. Toto rozhraní nastavím jako wall. Jelikož jsem rotaci disku nastavil už v Cell Zone Conditions v prostředí kapaliny pomocí možnosti Frame Motion, zde už rotaci nezádávám. Wall Motion proto nastavím jako Stationary Wall (stacionární stěna). Smykové podmínky nechám bez prokluzu. Drsnost jsem nezádal.

Wall (kryt)

Wall představuje pomyslný kryt mezi prostředím kapaliny a okolím. Vzhledem k rotaci kapaliny nastavené v Cell Zone Conditions pomocí Frame Motion je třeba nastavit kryt jako Moving Wall s tím rozdílem, že zde otáčky nezádávám. Rotaci krytu nastavím na 0 min^{-1} . Nastavím osu rotace ve směru osy z na hodnotu 1, jako u směru osy rotace kapaliny již specifikované dříve. Je třeba přepnout Motion (pohyb) na Absolute.

Pokud se pohybuje zóna buněk (cell zone) přiléhající ke stěně (například používám-li pohyblivý referenční rámec), můžu zvolit rychlostní rámec, který se vztahuje na pohyb zóny, a to tak, že povolím možnost relativní na sousední buňku (Relative to Adjacent Cell Zone). Pokud se rozhodnu určit relativní rychlost, nulová rychlost znamená, že stěna je v relativním rámu stacionární a proto se pohybuje rychlostí sousední buněčné zóny v absolutním rámci. Pokud se rozhodnu specifikovat absolutní rychlosti (povolením možnosti Absolute), rychlost nuly znamená, že stěna je v absolutním rámu stacionární a proto se pohybuje rychlostí sousední buněčné zóny - ale v opačném směru - Relativní referenční rámec.

4.3.6 Solution Methods (metody řešení)

Pro řešení parciálních diferenciálních rovnic je v řešiči ANSYS Fluent použita Metoda konečných objemů spočívající ve třech hlavních krocích:

- rozdělení oblasti na diskrétní objemy užitím obecné křivočaré sítě
- bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizace
- numerické řešení diskretizovaných rovnic

Diskretizovaná forma Navier-Stokesových rovnic ukazuje lineární závislost rychlosti na tlaku a naopak. Tato vzájemná vazba se nazývá „velocity pressure coupling“. K jejímu řešení jsem zvolil metodu SIMPLE [Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations]. SIMPLE, SIMPLEC, PISO a Fractional Step používají

oddělený algoritmus, kdy rychlostní pole je upřesňováno na základě výpočtu rozložení tlaků při respektování zákonů zachování hmoty a hybnosti. Je však možné vyřešit systém Navier-Stokesových rovnic současným řešením rychlostního a tlakového pole (metoda Coupled), přičemž se zajistí vzájemná vazba bilančních rovnic pomocí matice.

4.3.7 Solution Initialization

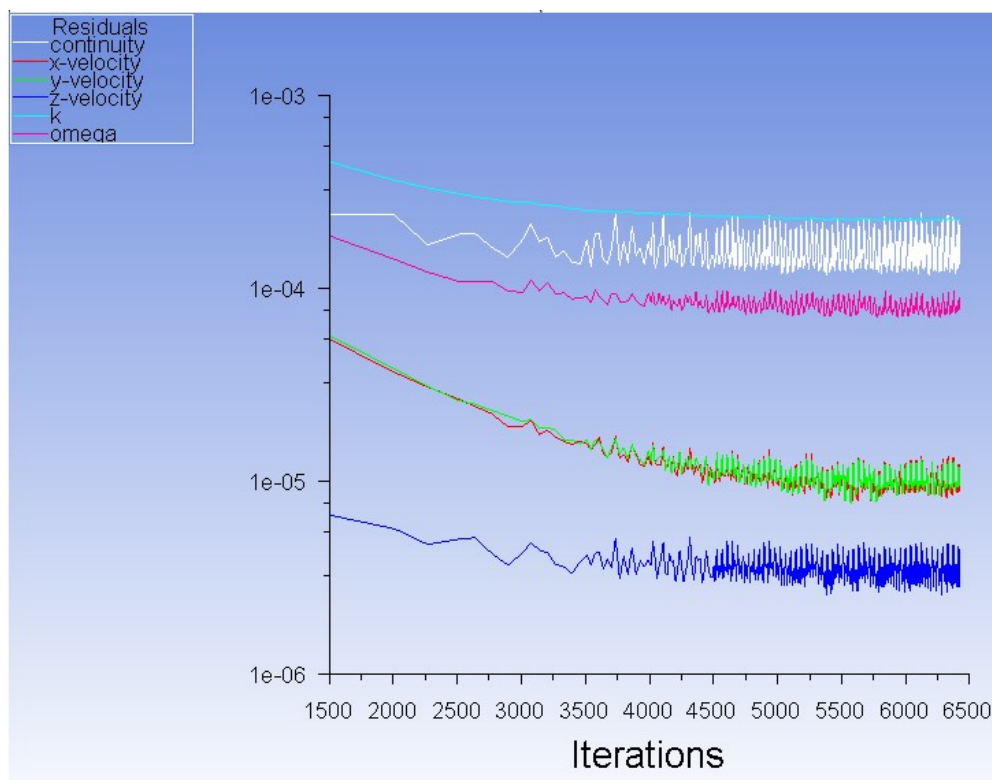
Inicializaci jsem použil hybridní počítaná ze všech okrajových podmínek. Mohla by ale být použita i Standardní inicializace počítaná ze vstupu.

4.4 Interpretace výsledků

Ke konvergenci výpočtu došlo již při 1500 iteracích. Výpočet jsem ale nechal počítat ještě déle, abych dosáhl maximální rychlosti rotující kapaliny. Kapalina totiž při dosažení konvergence nerotovala maximální rychlostí. Maximální rychlost rotace kapaliny by měla dosáhnout $39,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnotu jsem zjistil z rovnice 4.10

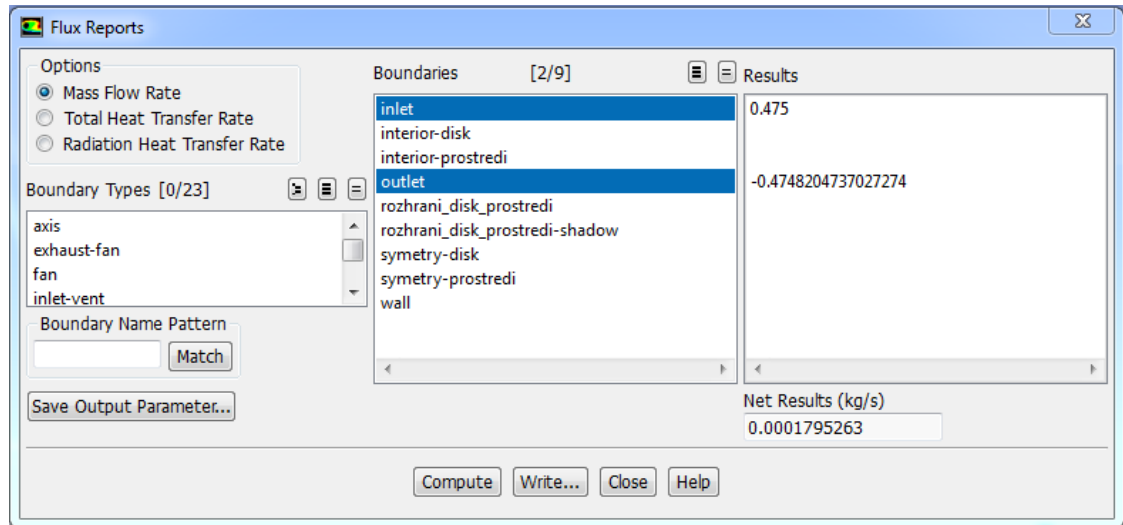
$$\omega = \pi \cdot D \cdot n = \pi \cdot 0,508 \cdot \frac{1500}{60} = 39,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4.10)$$

kde D – průměr kotouče, n – otáčky kotouče, ω – úhlová rychlost



obr. 4.14 Iterace

Rovnice kontinuity je zachována. To jsem ověřil pomocí Záložky Report→Fluxes →Mass Flow Rate. Zvolil jsem inlet (vstup) a outlet (výstup). Veškerý průtok kapaliny, který vteče do prostředí, z prostředí vyteče. Rozdíl mezi vstupem a výstupem sice není úplně nulový, ale výsledek je tak malý, že je zanedbatelný. Pravděpodobně je to způsobeno ještě malým počtem iterací, nebo zpětným prouděním.

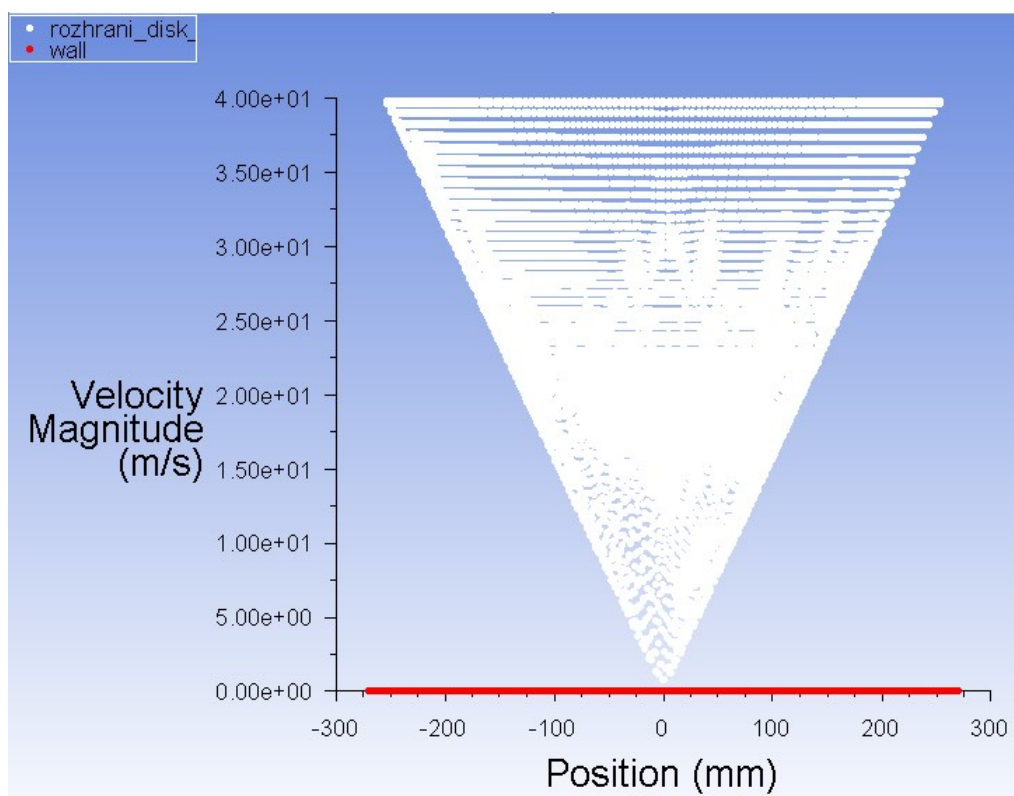


obr. 4.15 Kontrola rovnice kontinuity

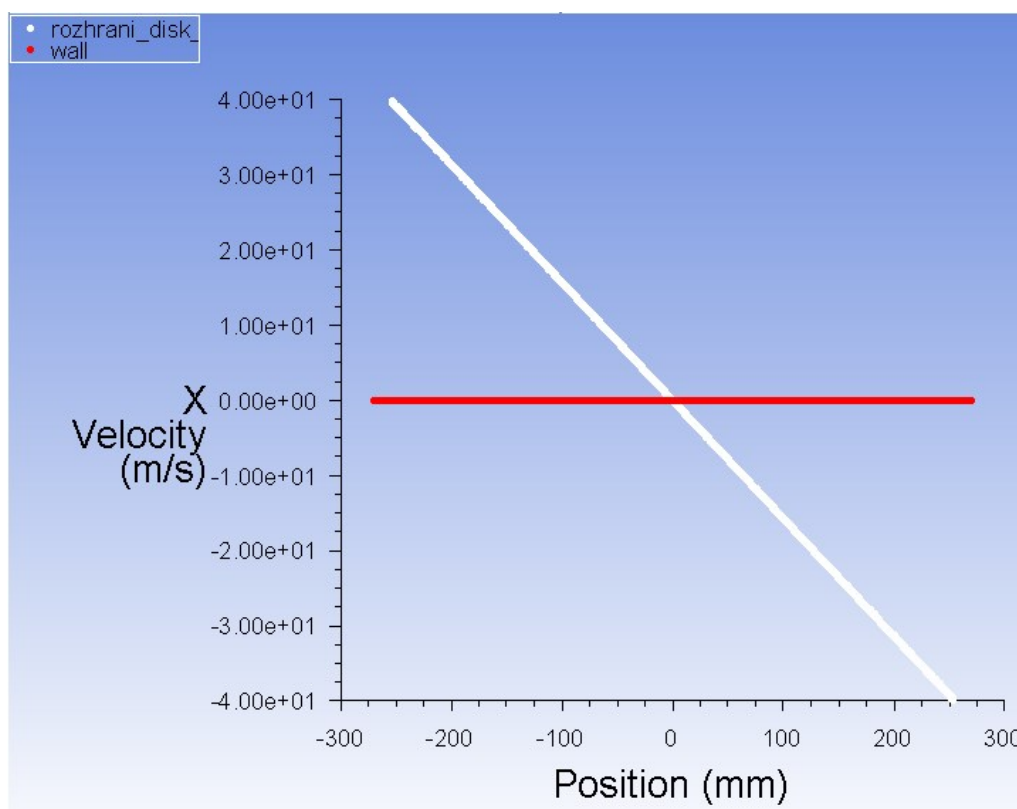
Mass Flow Rate		(kg/s)
<hr/>		
inlet		0.475
outlet		-0.47482047
<hr/>		
Net		0.0001795263

obr. 4.16 Výsledky z reportu

Obr. 4.17 znázorňuje rozložení rychlosti v závislosti na poloze na ploše kotouče a krytu. Bílé body představují plochu kotouče. Červené představují plochu krytu. Zde si můžeme ověřit, že platí výsledek z rovnice 4.10. Maximální rychlost zaznamenaná na ploše kotouče je téměř $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a odpovídá vypočtené hodnotě unášivé rychlosti z rovnice:



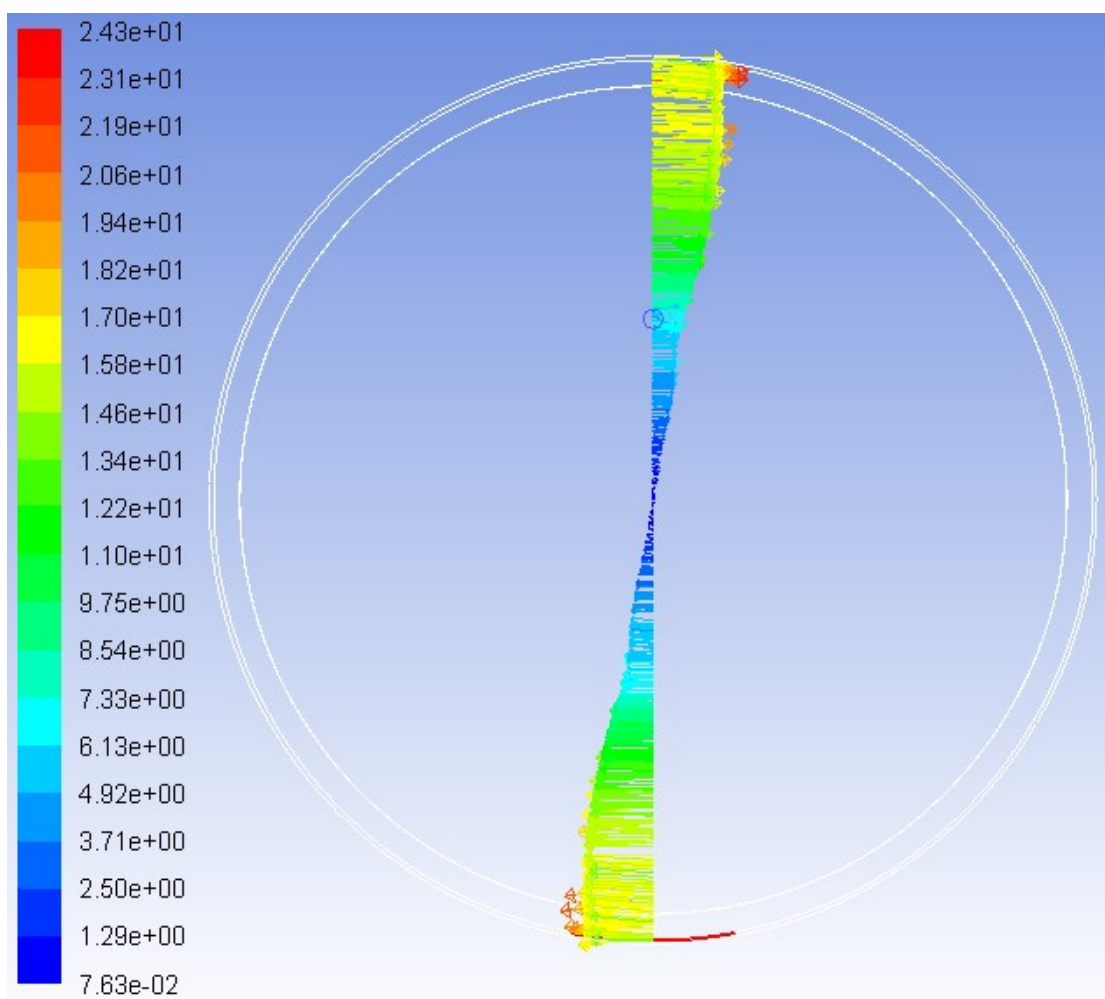
obr. 4.17 Rozložení rychlostí na ploše krytu a disku



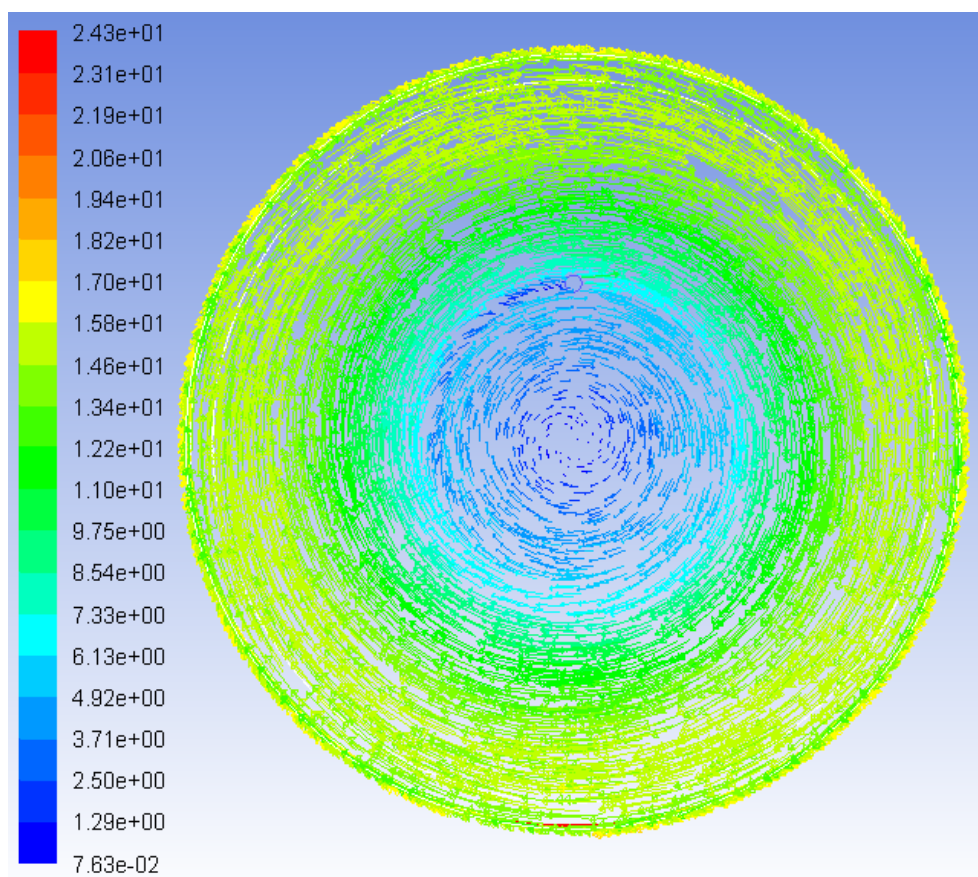
obr. 4.18 Rozložení rychlosti ve směru osy x

Na obr. 4.17 a 4.18 můžeme vidět, že rychlost rotující kapaliny se směrem od středu zvyšuje. Na obr. 4.19 je vykreslena rychlost na svislé ploše řezu. Jedná se o rychlost rotace kapaliny v prostředí, nikoli na disku. Proto kapalina nedosahuje maximální rychlosti $39,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tuto maximální rychlost lze vidět na obr. 4.17 a 4.18, které také znázorňují nárůst rychlosti směrem od středu. Jedná se však o plochu disku. Proto se hodnoty rychlosti liší.

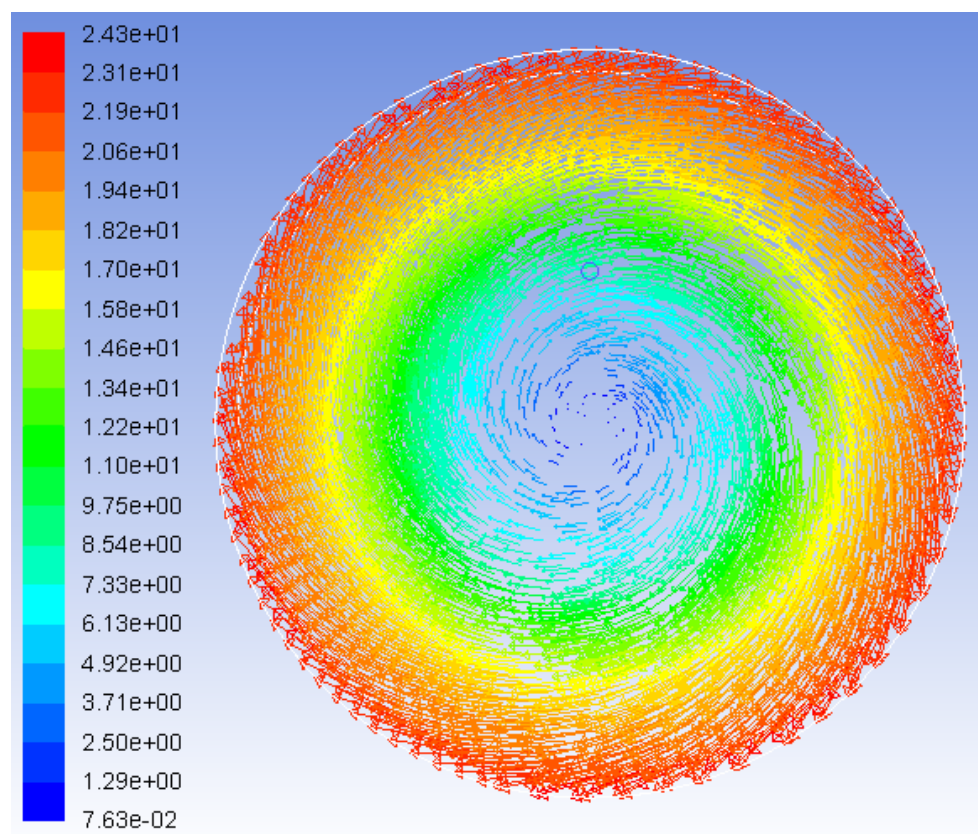
Na obr. 4.20 vidíme vektory rychlosti kapaliny na ploše krytu. V porovnání s rychlostmi z obr. 4.21, který znázorňuje vektory rychlosti kapaliny na ploše kotouče, jde vidět znatelný rozdíl rychlostí. K největší rotaci kapaliny dochází u plochy kotouče, jelikož se kotouč točí. Stěna krytu je stacionární, tudíž snižuje rychlost kapaliny.



obr. 4.19 Vektory kapaliny v prostředí na svislém řezu



obr. 4.20 Vektory rychlosti kapaliny v blízkosti krytu



obr. 4.21 Vektory rychlosti kapaliny v blízkosti kotouče

Kapalina při rotaci vytváří tlak na okolní prostředí. Průběh statického tlaku působícího na stěnu krytu jsem znázornil na obr. 4.22. Rozložení tlaku odpovídá tlaku rotaci kapaliny ve válci. Hodnoty jsem ověřil pomocí rovnice 4.12.

Hodnoty tlaku znázorněné v grafu jsem vykreslil v ose y. V ose x se nachází vstup a výstup kapaliny. U výstupu dochází k poklesu tlaku. Hodnoty tlaku u vstupu jsou naopak vyšší. Oba výkyvy tlaku jsou v grafu znázorněny. Vstup je označený červeně, výstup zeleně.

$$H_p = \frac{(r * \omega)^2}{2 * g} = \frac{\left(0,270 * 2 * \pi * \left(\frac{1500}{60}\right)\right)^2}{2 * g} = 53 \text{ mm} \quad (4.11)$$

$$p = \rho * g * H_p = 1000 * 9,81 * 53 = 52000 \text{ Pa} \quad (4.12)$$

Kde

H_p – výška paraboloidu

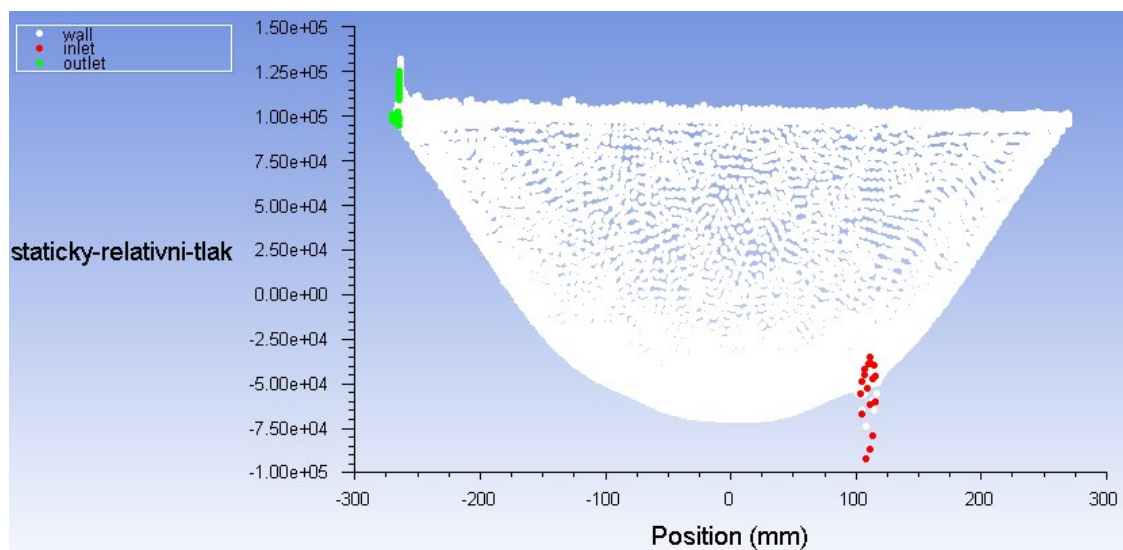
R – poloměr krytu

ω – úhlová rychlost

p – tlak

ρ – hustota vody

g – gravitační zrychlení

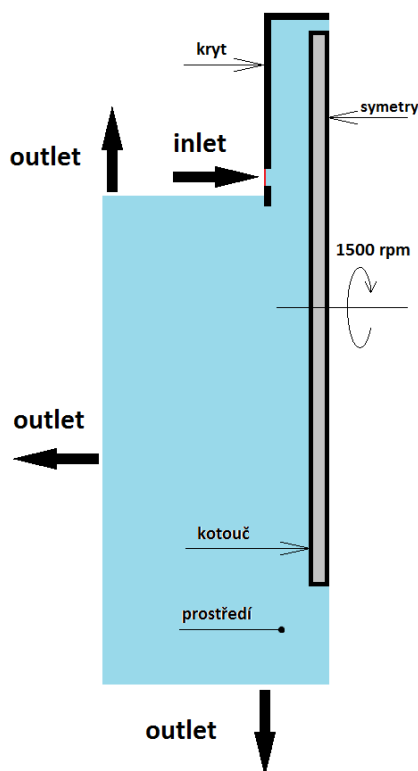


obr. 4.22 Průběh statického relativního tlaku

5 Numerické modelování dvoufázového proudění v rozšířené výpočetní oblasti bez přestupu tepla (VoF model)

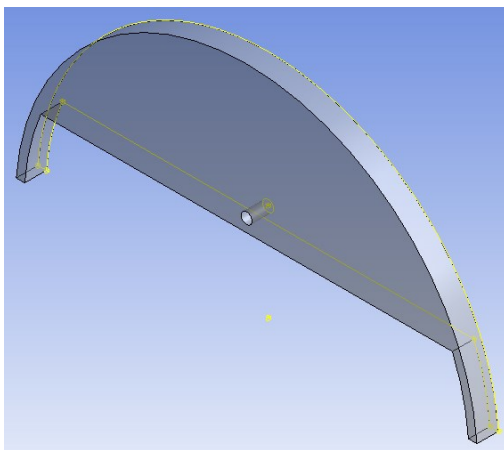
Na rozdíl od předchozího modelu, kdy byl řezný kotouč kompletně obklopen vodou, a řešil jsem proudění kapaliny v celém objemu prostředí, jsem v tomto modelu řešil proud chladicí kapaliny vystupující z trysky. Proud se následně rozlévá po stěně kotouče a rotace kotouče ho strhává ve směru rotace. Kotouč i kryt jsou obklopeny prostředím, které tvoří vzduch. Jelikož dochází k přestupu kapaliny do prostředí vzduchu, nastává mísení více fází (voda, vzduch). Tuto problematiku proto řeším jako vícefázové proudění.

5.1 Tvorba a popis geometrie modelu

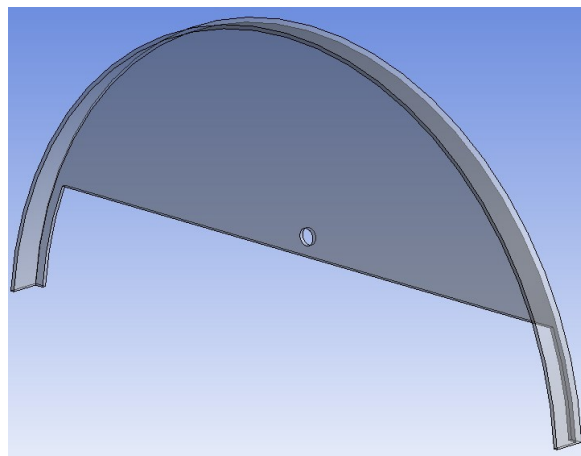


obr. 5.1 Zjednodušené schéma

Byla opět modelována polovina oblasti vzhledem k symetrii geometrie. Jako první jsem začal modelováním krytu. Vycházel jsem z kružnice, kterou jsem upravil do tvaru, který znázorňují žlutě olemované čáry na obr. 5.2. Funkcí extrude jsem dostal požadovanou šířku poloviny krytu. Abych docíлил krytu s požadovanou tloušťkou stěn, vnořil jsem do modelu krytu válec, kterým jsem následnou operací Boolean odstranil přebytečný materiál krytu. Válec kopíroval stěny a rádius krytu tak, že po operaci Boolean vznikl kryt s tloušťkou stěny 3 mm. Nyní jsem dostal tvar krytu obr 5.3.

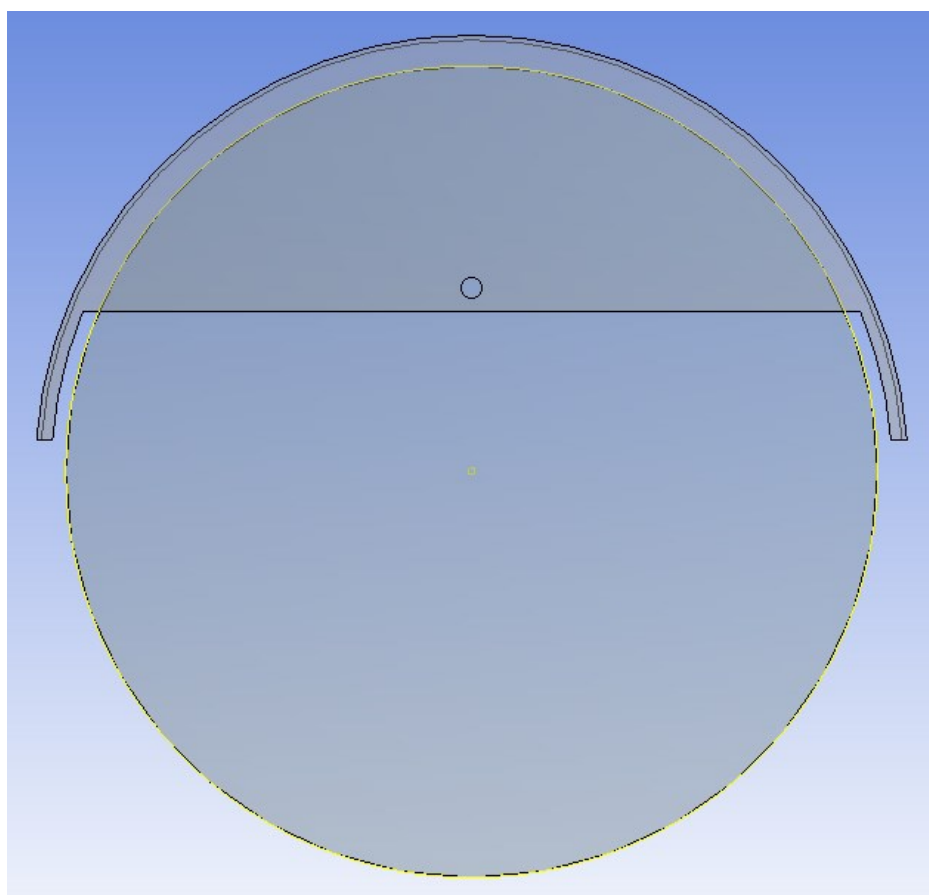


obr. 5.2 *Geometrie krytu*



obr. 5.3 *Finální vzhled krytu*

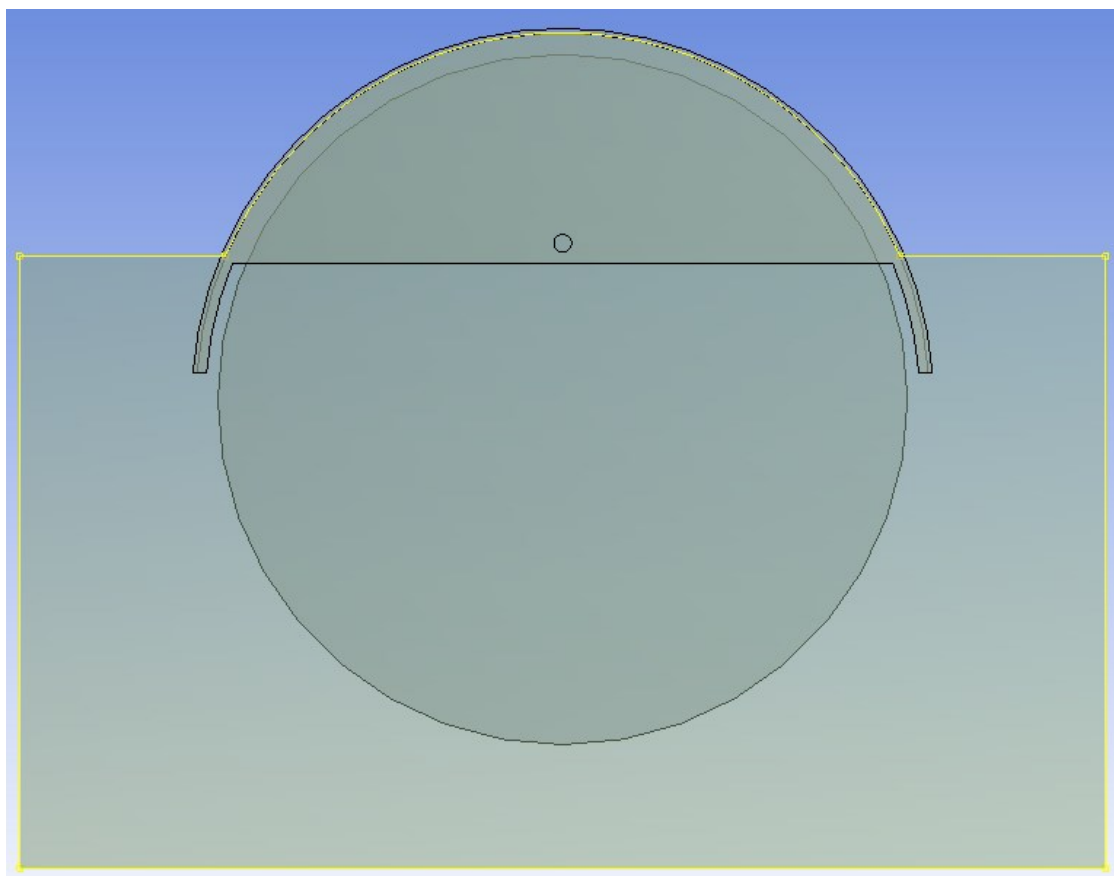
V dalším kroku jsem vytvořil řezný kotouč. Žlutou kružnici na obr. 5.4 jsem funkcí extrude vysunul na tloušťku 1,75 mm, což je polovina tloušťky disku. Celková tloušťka disku je 3,5 mm.



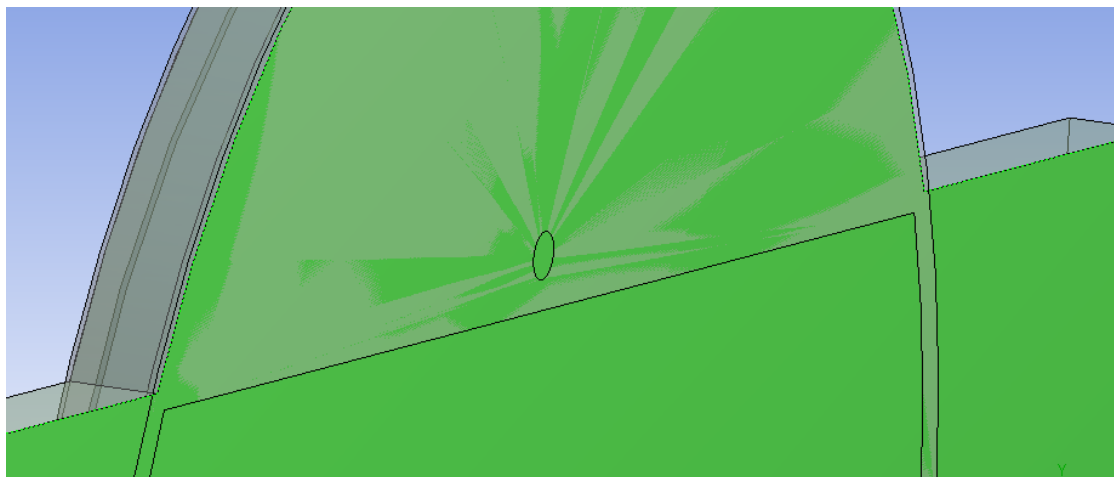
obr. 5.4 *Kryt s kotoučem*

Vstup kapaliny (input) nemůže být ve Fluentu obklopený ze dvou stran modelem. Musel jsem prostředí vymodelovat na dvě části. Vstup kapaliny na krytu mi nedovolil celý model kompletně obklopit prostředím vzduchu. Prostředí by zasahovalo z obou stran vstupu. Takovýmto způsobem pak nelze ve Fluentu nastavit vstup kapaliny jako input. Proto jsem Prostředí rozdělil na dvě poloviny a následně obě části pomocí funkce Boolean spojil v jednu.

První část prostředí, obr. 5.5, kopíruje vnitřní rádius krytu až do úrovně, těsně pod vstup kapaliny do prostředí (input). Doplnil jsem na obdélník libovolných rozměrů tak, aby obklopoval zbylou část modelu a byl dostatečně velký, aby při odstříkávání kapaliny od kotouče, byly trajektorie kapaliny dostatečně dlouhé. Ze zelené plochy na obr. 5.6 je jasné viditelné, že jsem první část prostředí vysunul až do roviny vnější strany krytu. To proto, aby prostředí zasahovalo i do otvoru pro vstup kapaliny. Prostředí, které zasahuje do objemu krytu a kotouče jsem následně odstranil funkcí Boolean.

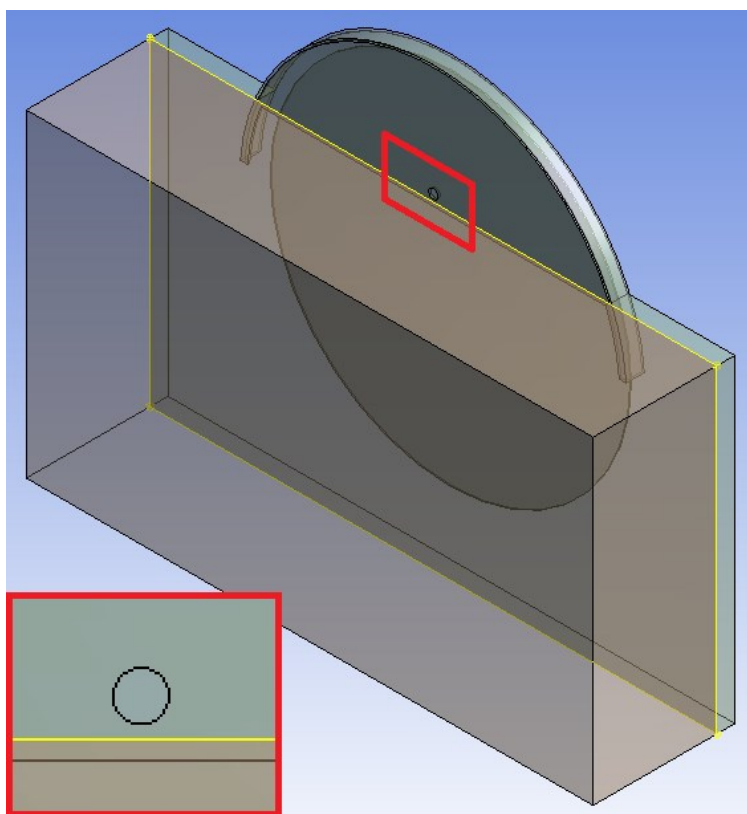


obr. 5.5 Vysunutí prostředí



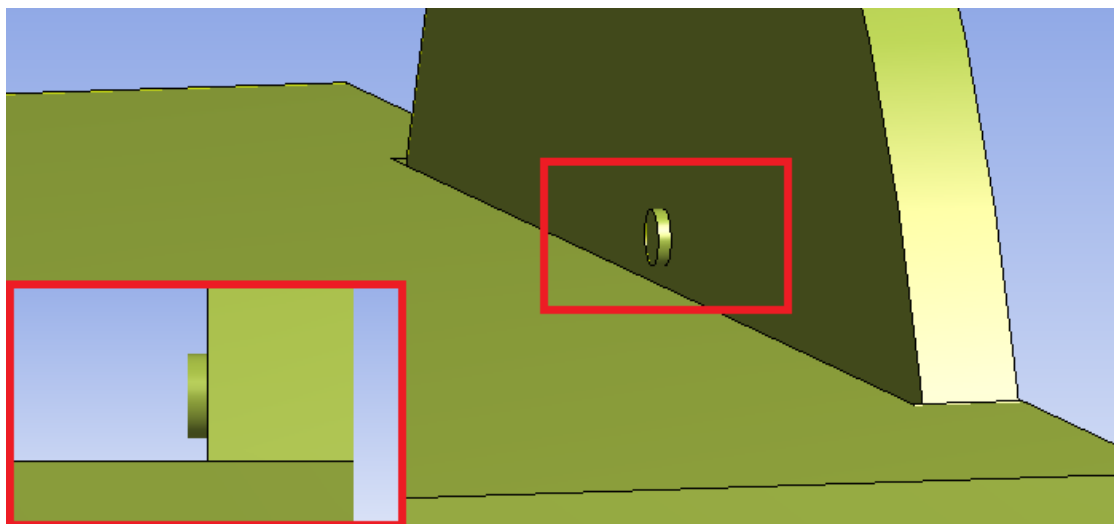
obr. 5.6 Označená plocha prostředí zároveň s krytem

Druhou polovinu prostředí tvoří kvádr, který svou podstavou navazuje na kvádr z prvního prostředí. Vysunutí kvádrů jsem zvolil dle svého uvážení. Mělo by být dostatečně široké, aby odstříkující voda od kotouče měla alespoň nějakou dráhu, pro pozdější zaznamenání v numerické simulaci. Na detailu obr. 5.7 si lze všimnout, že prostředí je těsně pod úrovní inputu kapaliny. Nebylo třeba prostředí modelovat zbytečně vysoko. Předpokládal jsem už z měření ve firmě Struers, že největší proud odstříkující kapaliny bude ve směru rotace od krytu dolů a dozadu.



obr. 5.7 Detail vstupu (inletu) nad prostředím

Pomocí funkce Boolean, operace unite, spojmím obě vymodelované prostředí v jedno. Jelikož prostředí stále zasahuje do objemů kotouče a krytu, Funkcí Boolean, operací subtract, odstraním zasahující prostředí z objemů ostatních částí. Nyní dostávám tři samostatné části a to kryt, kotouč a prostředí. Pokud skryji kryt disku, lze na detailu obr. 5.8 vidět výstupek prostředí, které zasahuje do díry v krytu. Kruhová plocha tohoto prostředí představuje vstup kapaliny do prostředí (inlet).

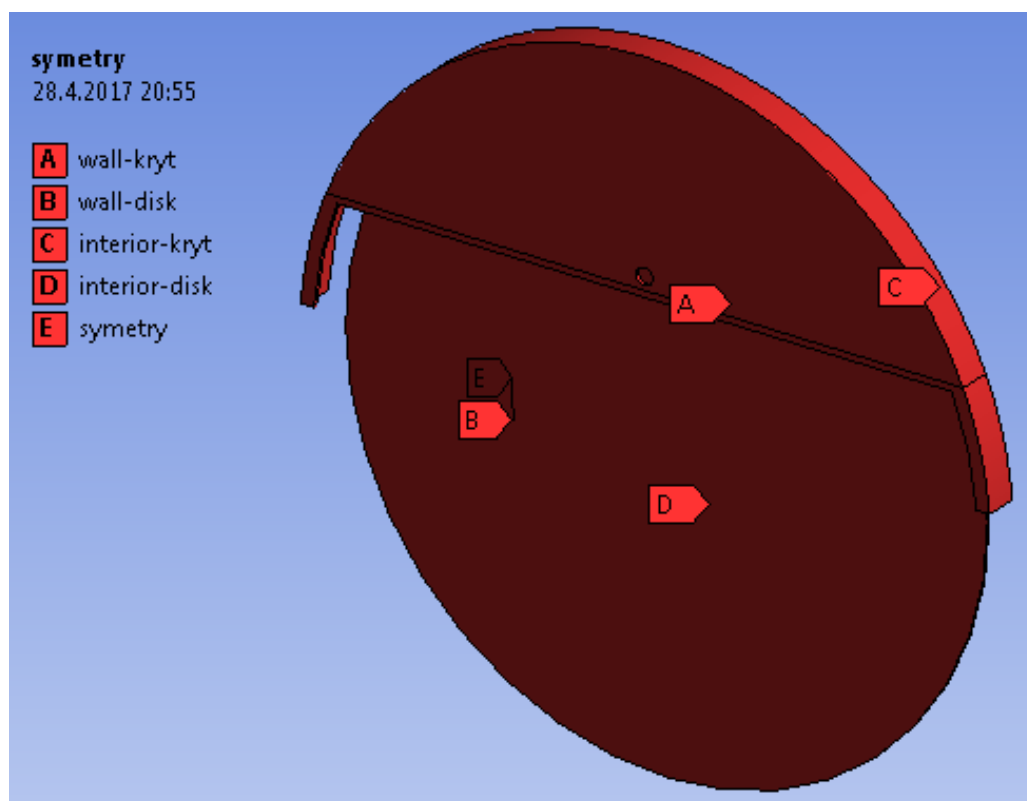


obr. 5.8 Detail inletu bez krytu

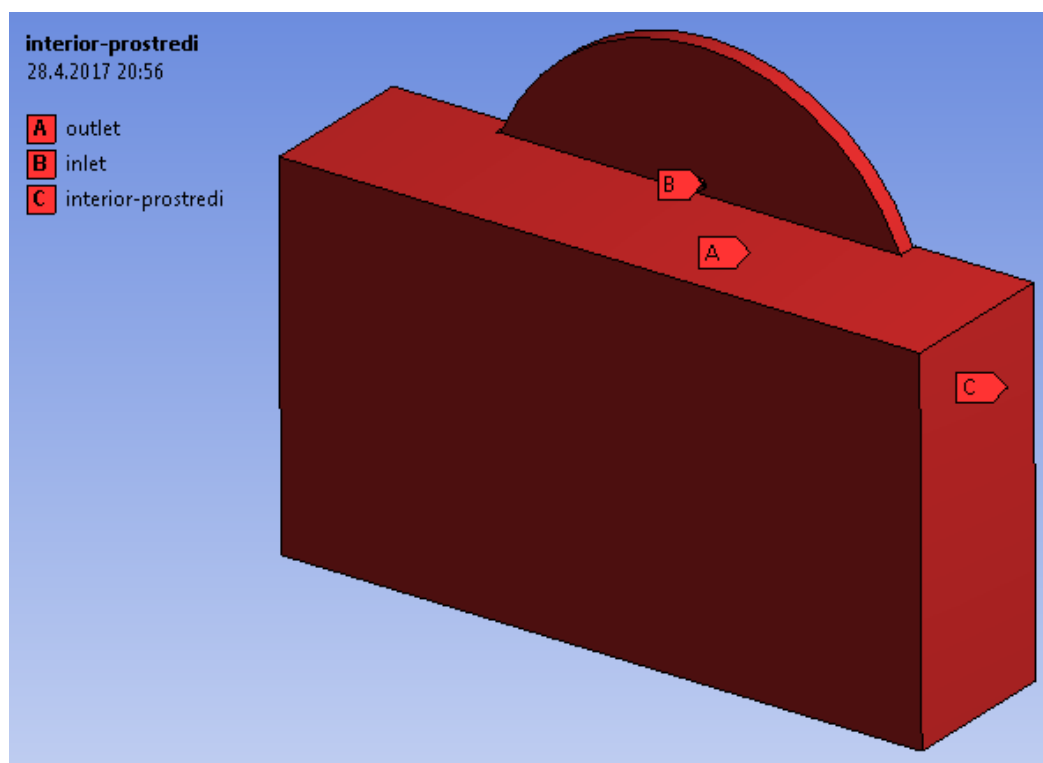
5.2 Tvorba sítě

Velké rozměry oblasti vzduchu hodně stěžují tvorbu jemné sítě, protože jsem omezený počtem buněk, jejichž přípustný maximální počet je 500000. I to je jeden z důvodů, proč jsem prostředí reprezentující okolí disku nemodeloval příliš velké. V předchozím případě, kdy jsem řešil zjednodušený model a prostředí bylo relativně malé, jsem mohl udělat hustou mezní vrstvu. Mezní vrstva potřebuje velké množství buněk. Jelikož v tomto modelu není prioritou řešení rotaci kapaliny kolem disku, ale i proudové pole kapaliny mimo disk, nepotřeboval jsem hustou mezní vrstvu u plochy disku. Vytvořením mezní vrstvy bych se ochudil o hustší síť v oblasti prostředí.

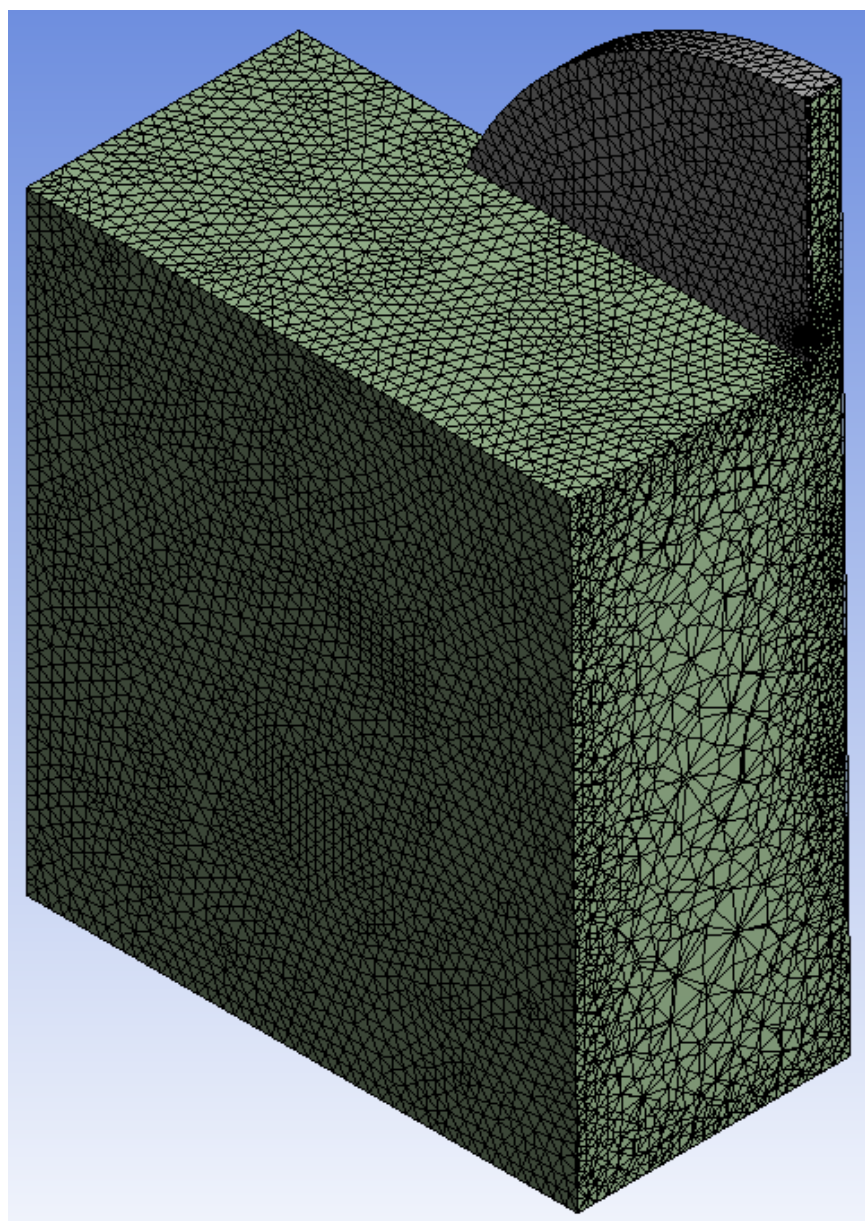
Typ buněk	tetraheadrones
Celkový počet elementů	441788
Celkový počet uzlů	88538
Maximální velikost plochy buňky	9 mm



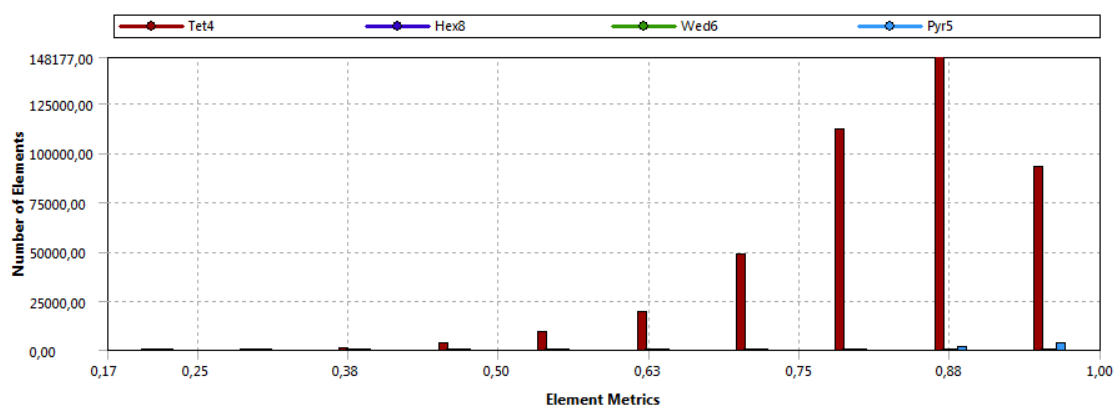
obr. 5.9 Name selection krytu a kotouče



obr. 5.10 Name selection prostředí, vstupu a výstupu



obr. 5.11 Nespecifikovaná síť se zhuštěním po krajích



obr. 5.12 Kontrola kvality sítě

5.3 Nastavení modelu Volume of Fluid

Zádání úlohy bylo provedeno pomocí následujících kroků:

- Nastavení a řešení nestacionárního problému založeného na aplikaci Pressure-Based řešiče a modelu Volume of Fluid vícefázového proudění.
- Definice okrajových podmínek pro dvě fáze.
- Definice počátečních podmínek pomocí příkazu patch v podmnožině domény
- Automatické ukládání datových souborů během řešení.
- Vyhodnocení objemové frakce vody v modelované oblasti.

5.3.1 General

Typ

Jako typ řešitele jsem zvolil Pressure-Based (na základě tlaku) dále jen P-B.

Rychlostní formulace

Specifikaci rozdílu mezi absolutní a relativní rychlostní formulací jsem se věnoval v kapitole 4.3.1 Rychlostní formulace. V tomto modelu jsem zvolil typ rychlostní formulace absolutní a to ze stejného důvodu jako v případě zjednodušeného modelu. Předpokládal jsem, že největší zavírání kapaliny bude pouze v blízkosti rotujícího kotouče.

Gravitační zrychlení

Gravitační zrychlení jsem nastavil na hodnotu $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Časově závislá úloha

Tato úloha zahrnuje výpočet vícefázového proudění. Vícefázové proudění se řeší jako časově závislá úloha (Transient). Zapnutím časově závislé úlohy se zpřístupní další možnosti řešitele v metodách řešení (Solution Methods). Více v kapitole 5.3.8 Solution Methods.

Povolení časové závislosti je užitečné při pokusu o vyřešení problémů v ustáleném stavu, které mají tendenci k nestabilitě (např. přirozeným problémům s konvekcí, u nichž je číslo Rayleighu blízké přechodové oblasti). V mnoha případech je možné dosáhnout řešení ustáleného stavu integrací časově závislých rovnic.

5.3.2 Models

Multiphase Model

V okně Multiphase Model zvolím v záložce Model možnost Volume of Fluid.

VoF model může modelovat dvě nebo více nemísitelných tekutin tím, že řeší jednu sadu rovnic a sleduje objemovou frakci každé z tekutin v celé doméně. Typické aplikace zahrnují předpověď rozptylu trysek, pohyb velkých bublin v kapalině, pohyb kapaliny po přerušení přehradu a stálé nebo přechodné sledování jakéhokoliv rozhraní kapaliny a plynu.

Formulace VoF se opírá o skutečnost, že dvě nebo více tekutin (nebo fází) nejsou vzájemně propojené. Pro každou další fázi, kterou přidám do modelu, je zavedena proměnná: objemový díl fáze ve výpočetní buňce. V každém kontrolním objemu se objemové frakce všech fází shlukují k jednotě. Políčka pro všechny proměnné a vlastnosti jsou sdíleny fázemi a představují hodnoty průměru objemu, pokud je objemová fáze každé z fází známa v každém místě. Proměnné a vlastnosti v dané buňce jsou tedy čistě reprezentativní pro jednu z fází nebo reprezentativní pro směs fází v závislosti na hodnotách objemové frakce. Jinými slovy, pokud je q^{th} objemová frakce kapaliny v buňce označena jako α_q , pak jsou možné následující tři podmínky:

- $\alpha_q = 0$: Buňka je prázdná (q^{th} kapaliny).
- $\alpha_q = 1$: Buňka je plná (q^{th} kapaliny).
- $0 < \alpha_q < 1$: Buňka obsahuje rozhraní mezi q^{th} kapalinou a jednou nebo více dalšími kapalinami.

Na základě lokální hodnoty α_q budou příslušné vlastnosti a proměnné přiřazeny každému kontrolnímu svazku v doméně.

V dialogovém okně Volume Fraction Parameters zvolím Explicitní formulaci. Explicitní formulace je časově závislá a objemová frakce je diskretizována následujícím způsobem:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{qf}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha q} \right] \quad (4.13)$$

$n+1$ – index pro nový (aktuální) časový krok, n – index předchozího časového kroku, α_{qf} – nominální hodnota q objemové frakce, V – objem buňky, U_f – Objemový tok skrz plochu, založený na normální rychlosti

Vzhledem k tomu, že frakce objemu v aktuálním časovém kroku je přímo vypočtena na základě známých veličin v předchozím časovém kroku, explicitní formulace nevyžaduje a iterativní řešení dopravní rovnice během každého časového kroku.

Viscous Models

Obdobně jako u předchozího modelu předpokládám, že proudění bude turbulentní. Zvolil jsem turbulentní model RNG **k-epsilon (k-ε)**. Rozdíl mezi *k-ε* a *k-ω* jsem popsal v kapitole 4.3.2 (Models).

Model RNG byl odvozen pomocí statistické techniky nazvané teorie renormalizačních skupin. Forma je podobná standardnímu modelu, ale zahrnuje následující vylepšení:

- Model RNG má ve své rovnici dodatečný ε výraz, který zlepšuje přesnost pro rychle narůstající toky.
- Efekt víření turbulence je zahrnut v modelu RNG, což zvyšuje přesnost vířivých proudů.
- Teorie RNG poskytuje analytický vzorec pro turbulentní Prandtlovo číslo, zatímco standardní *k-ε* model využívá konstantní hodnoty určené uživatelem.
- Zatímco standardní model je model s vysokým Reynoldsovým číslem, teorie RNG poskytuje analyticky odvozený diferenciální vzorec pro efektivní viskozitu, který odpovídá efektu s nízkým Reynoldsovým číslem. Účinné využití tohoto prvku však závisí na vhodném ošetření oblasti blízké stěny.

Model turbulence RNG *k-ε* turbulence je odvozen z okamžitých Navier-Stokesových rovnic pomocí matematické techniky nazývané metody "renormalizační skupiny" (RNG). Analytická derivace má za následek model s konstantami odlišnými od konstant ve standardním *k-ε* modelu a další termíny a funkce v transportních rovnicích pro *k* a ε .

Transportní rovnice pro RNG *k-ε* model:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon$$

kde

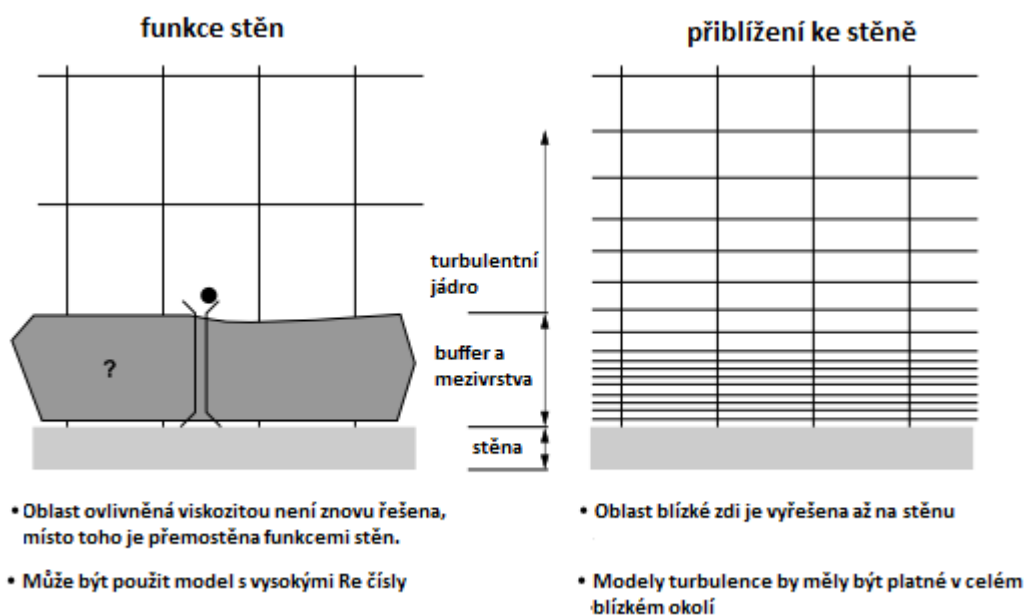
- G_k představuje generaci kinetické energie turbulence v důsledku středních rychlostních gradientů

- G_b je generace kinetické energie turbulence v důsledku vztlaku
- α_k a α_ε jsou inverzní efektivní Prandtlůva čísla pro k a ε odvozené na základě RNG teorie
- S_k a S_ε jsou uživatelské definované zdrojové výrazy
- R další člen v rovnici pro rychlost disipace, který způsobí, že v oblastech s velkým smykovým napětím deformujícím proudění počítá RNG $k - \varepsilon$ model nižší turbulentní viskozitu. Model je citlivější na rychlé změny napětí a zakřivení proudů, což umožňuje řešit širokou oblast složitého proudění.

V okně Near-Wall Treatment jsem zvolil funkci Standard Wall Functions (standartní stěnová funkce).

Tradičně existují dva přístupy k modelování oblasti blízké zdi. V jednom přístupu se vnitřní oblast postižená viskozitou (viskózní podvrstva a vyrovnávací vrstva) nevyřeší. Namísto toho se semiempirické vzorce nazvané "funkce stěn" používají k překlenutí oblasti postižené viskozitou mezi stěnou a plně turbulentní oblastí. Použití funkcí stěn odstraňuje potřebu modifikovat modely turbulence tak, aby odpovídaly přítomnosti stěny.

V dalším postupu jsou moduly turbulence modifikovány tak, aby umožnily, aby oblast postižená viskozitou byla vyřešena sítí až ke stěně, včetně viskózní podvrstvy. Tento proces budu nazývat "přiblížením ke stěně". Tyto dva přístupy jsou schematicky znázorněny na obr. 5.13.



obr. 5.13 Modelování u stěny [8]

Funkce stěn jsou souborem polo-empirických vzorců a funkcí, které ve skutečnosti "přemostňují" nebo "propojují" proměnné roztoku na buňkách blízké stěně a odpovídající množství na stěně. Funkce stěn obsahují:

- Zákon o stěně pro střední rychlost a teplotu (nebo jiné skaláry)
- Vzorce pro blízké turbulentní veličiny

5.3.3 Materials

Model obsahuje dvě tekutiny a jeden typ pevného materiálu. Vodu použiji jako chladicí emulzi kotouče. Vzduch je v celém prostředí. Kotouč a kryt jsou z oceli.

5.3.4 Cell Zone Conditions

Charakteristiky jednotlivých zón jsem již popsal v předchozí kapitole 4.3.4 Cell Zone Conditions, odstavec disk-solid a prostředí-fluid.

disk-solid

Disk jsem nastavil jako solid. V nabídce Material Name jsem vybral steel (ocel).

kryt-solid

Kryt jsem nastavil jako solid. V nabídce Material Name jsem vybral steel (ocel).

prostředí-fluid

Prostředí jsem nastavil jako fluid. Jelikož se jedná o vícefázový model, specifikace tekutiny zde neprovádím. Popis funkce „Patch“ budu vysvětlovat v pozdější kapitole 5.3.9.

5.3.5 Nastavení primární a sekundární fáze

Předtím, než začnu nastavovat Boundary Conditions, musím určit, která fáze bude primární a která sekundární. Fáze je třeba rozlišit, protože musím nastavit, jaká fáze se v modelu vyskytuje a která do něj vstupuje.

Primární fáze je ta fáze, která se vyskytuje v modelu. V mém případě je to vzduch, proto jako primární fázi nastavím vzduch. Označím primární fázi, kliknu na tlačítko Edit... a v kolonce name přepíši název phase-1 na air (vzduch).

Sekundární fáze je fáze, která do modelu vstupuje ze vstupu. V mém případě se jedná o vodu. Obdobně jako u první fáze přejmenuji phase-2 na water-l (voda).

5.3.6 Interakce mezi fázemi

V kartě Setting Up Physics v záložce Phase vyberu možnost Interactions.... Otevře se mi volba Interakce fází (Phase Interaction). V záložce Surface Tension označím možnost Surface Tension Force Modeling. Tím zapnu povrchového napětí

mezi oběma fázemi. Model zvolím Continuum Surface Force (kontinuální povrchová síla). Hodnotu povrchového napětí nastavím na $0,015 \text{ n}\cdot\text{m}^{-1}$.

Kontinuální povrchová síla přidává povrchové napětí k výpočtu VoF, což má za následek zdrojový člen v rovnici hybnosti. Tato metoda je k dispozici pouze pro modely VoF a Eulerian.

5.3.7 Boundary Conditions

Inlet

Stejně jako v předchozí kapitole, nejjednodušším způsobem zadání průtoku je hmotnostní zlomek. Inlet jsem nastavil jako mass-flow-inlet. Abych specifikoval výstup fáze z trysky, musím přepnout záložku Phase z mixture na water-liquid. Tlačítkem Edit...se zpřístupní nabídka zadání hmotnostního průtoku. Hmotnostní průtok jsem nastavil na hodnotu $0,475 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Stejným způsobem nastavím hodnotu objemového zlomku pro vzduch, ale s tím rozdílem, že hodnota bude $0 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Outlet

Outlet nastavím jako pressure-outlet (tlakový výstup).

Interior disk a interior kryt

Obě hodnoty interioru jsem již nastavil v záložce Cell Zone Conditions. Možnost další specifikace se nenaskytuje.

Interior prostředí

Nastavení interioru prostředí jsem již provedl v záložce Cell Zone Conditions. Možnost další specifikace se nenaskytuje.

Symetry disk, kryt a prostředí

Tyto plochy představují plochy symetrie geometrie. Všechny tyto plochy jsem nastavil jako typ symmetry.

Wall disk shadow (plocha disku)

Plocha disku rotuje, proto jsem ji nastavil jako Moving Wall. Motion je Absolutní. Popis rozdílu mezi Relative to Adjacent Cell Zones a Absolute jsem popsal v kapitole 4.3.5. Rotaci disku jsem nastavil na otáčky 1500 min^{-1} . Směr osy rotace volím v ose z hodnotou -1.

Wall kryt (plocha krytu)

Typ plochy krytu jsem zvolil wall. Kryt plní jen účel stěny.

5.3.8 Solution Methods

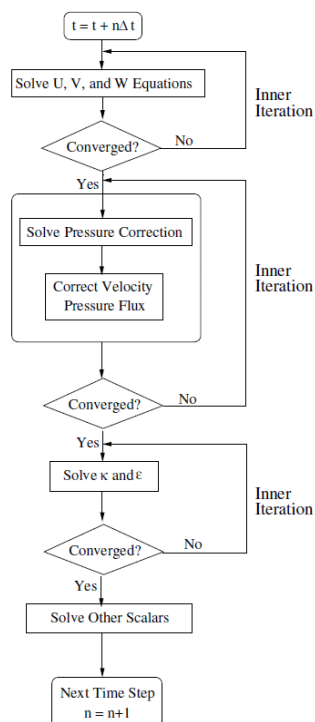
Tato úloha zahrnuje výpočet vícefázového proudění. Vícefázové proudění se řeší jako časově závislá úloha (Transient). K řešení úlohy jsem použil metodu Fractional Step.

Fractional Step

Metoda Fractional Step (FSM) je k dispozici, když se rozhodnu použít schéma NITA (beziterační časový posun). S pomocí schématu NITA je FSM ve srovnání s algoritmem PISO o něco méně náročné na výpočet. U některých problémů (např. Simulací, které používají VoF) může být FSM méně stabilní než PISO.

NITA (Non-Iterative Time-Advancement)

Iterativní schéma časového posunu vyžaduje značné množství výpočetní intenzity kvůli velkému počtu vnějších iterací provedených pro každý časový krok. Myšlenka, která je základem schématu neiteračního časového posunu (NITA), je, že pro zachování celkové časové přesnosti není potřeba snížit chybu v jednom časovém kroku (splitting error) na nulu, ale pouze dosáhnout stejného řádu přesnosti jako má chyba jedné iterace (truncation error). Schéma NITA, jak je vidět na obr. 5.14, nepotřebuje vnější iterace a provádí pouze jednu vnější iteraci v časovém kroku, což výrazně zrychluje přechodné simulace. Nicméně, schéma NITA stále umožňuje vnitřní iteraci vyřešit jednotlivé množiny rovnic.

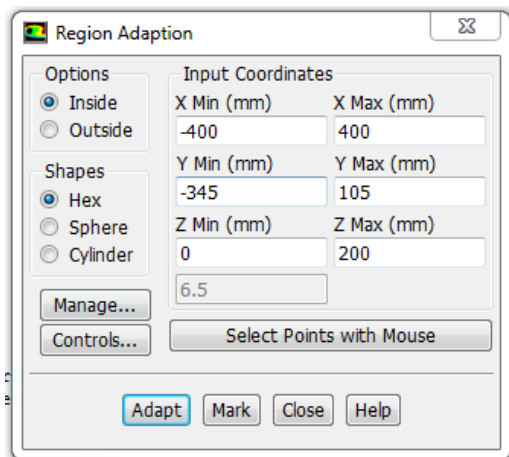


obr. 5.14 Schéma NITA [8]

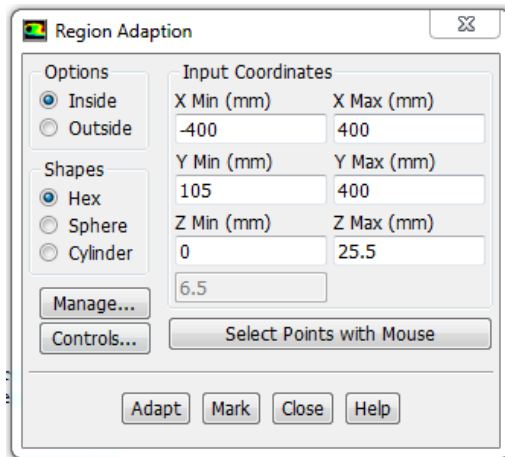
5.3.9 Solution initialization a patch prostředí

Pomocí příkazu Patch jsem nastavil hodnotu sekundární fáze, která bude obsažena v prostředí. Prostředí obsahuje pouze primární fázi a tou je vzduch. Nejprve jsem musel model inicializovat. Použil jsem hybridní inicializaci.

V nabídce Mark/Adapt Cells jsem zvolil příkaz Region k označení buněk. Označené buňky jsem použil k patchování prostředí. Metodou Hex zadám hodnoty v souřadnicovém systému x,y,z. Tlačítkem Mark označím buňky dle zadaných souřadnic. Označování opakuji, dokud nevymezím požadovanou geometrii.



obr. 5.15 Region adaption 1



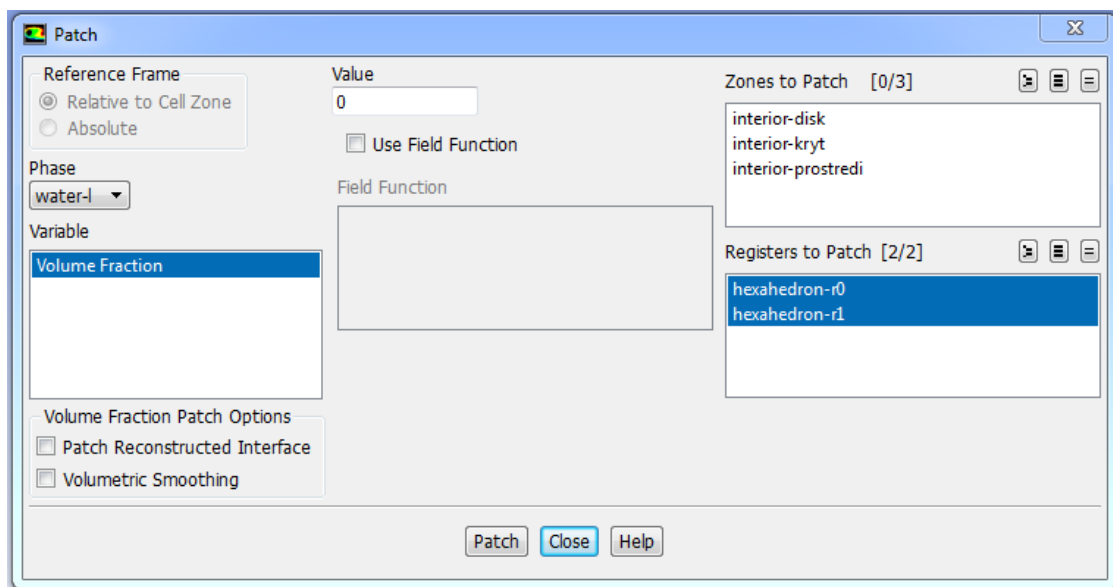
obr. 5.16 Region adaption 2

```
405498 cells marked for refinement, 0 cells marked for coarsening
Additional cells might have been marked because of the requirements of the
adaption algorithms.
```

```
36290 cells marked for refinement, 0 cells marked for coarsening
Additional cells might have been marked because of the requirements of the
adaption algorithms.
```

obr. 5.17 Počet označených buněk

V záložce Solution Initialization kliknu na Patch.... Označené buňky jsou v okně Registers to Patch. Vyselektuji všechny označené buňky. Přepnu fázi na water-I (vodu) a označím Volume Fraction. Množství vody v prostředí nastavím v kolonce Value na 0. Neberu v potaz vzdušnou vlhkost. Tlačítkem Patch potvrdím nastavení.



obr. 5.18 Nastavení množství vody v prostředí

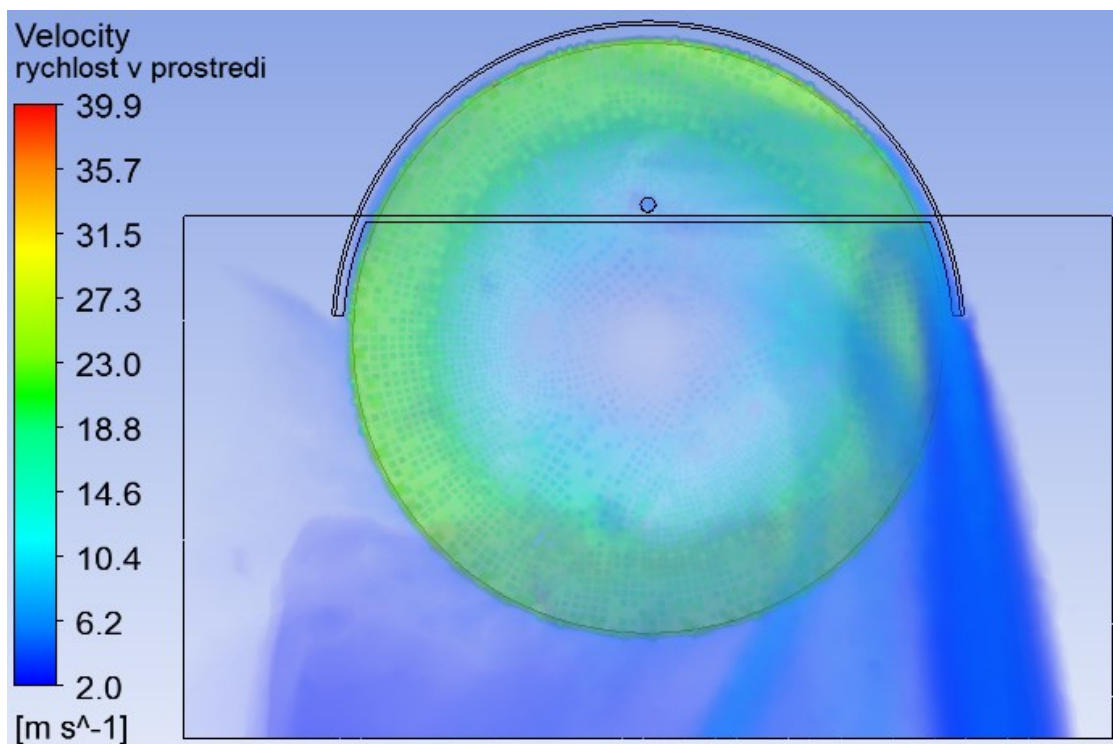
5.3.10 Run Calculation

Velikost časového kroku jsem nastavil na 0,001 s. Kratší časový krok měl za následek nestabilní výpočet.

5.4 Interpretace výsledků VoF modelu



obr. 5.19 *Skutečný odstřík kapaliny*



obr. 5.20 *Simulovaný odstřík kapaliny*

Z obr. 5.19 a 5.20 můžeme porovnat průběh odstříku kapaliny od krytu kotouče. Odstřík od krytu je přibližně podobný, s tím rozdílem, že při skutečném řezání se

kapalina odstříkovala zpět. To bylo způsobeno úpravou původního krytu. Na ten byl přidán zakončení krytu, které zabraňuje velkému odstříku kapaliny v řezné komoře vpřed. Pokud ale porovnáme trajektorie kapaliny, která se nezachycuje o již zmíněném zakončení krytu, oba obrázky se přibližně shodují.

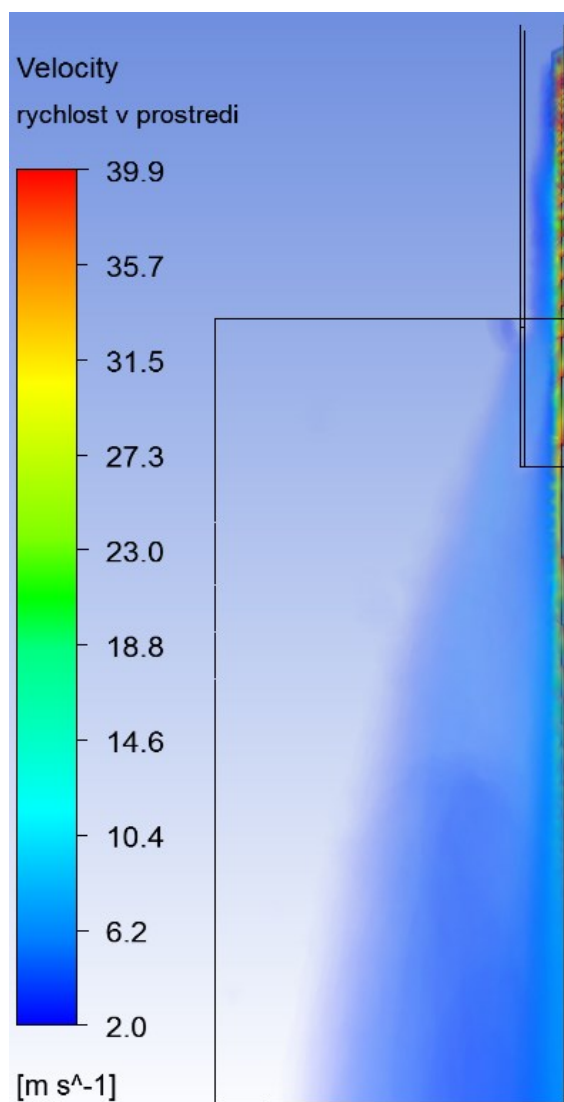


obr. 5.21 *Odklonění kapaliny od osy rotace*

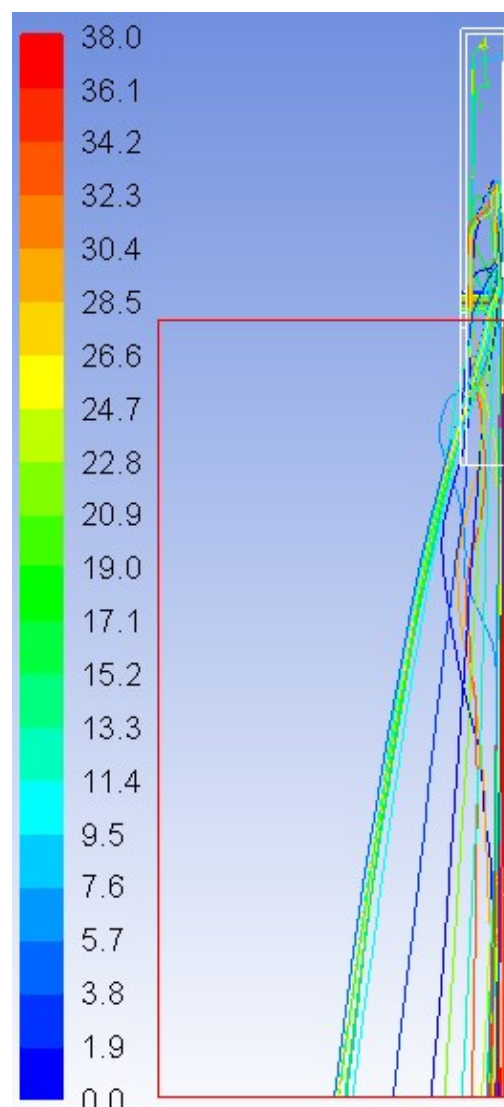
Další porovnání vidíme z obr. 5.21, 5.21 a 5.23. Na obr. 5.21 lze vidět odklonění kapaliny od osy rotace kotouče. Toto odklonění je částečně zapříčiněno již zmíněnou modifikací krytu kotouče. Při bližším prozkoumání při měření jsem zjistil, že koncový plech není symetrický. Ukončení plechu je na jedné straně o trochu delší než na druhé, Proto kapalina odstříkovala na každé straně jinak. Z obrázku to však není zřejmé a na řezání to nemá žádný závratný vliv.

Pokud se tedy zaměřím jen na porovnání odklonu kapaliny od osy kotouče, můžu tvrdit, že simulace je do jisté míry podobná skutečným hodnotám.

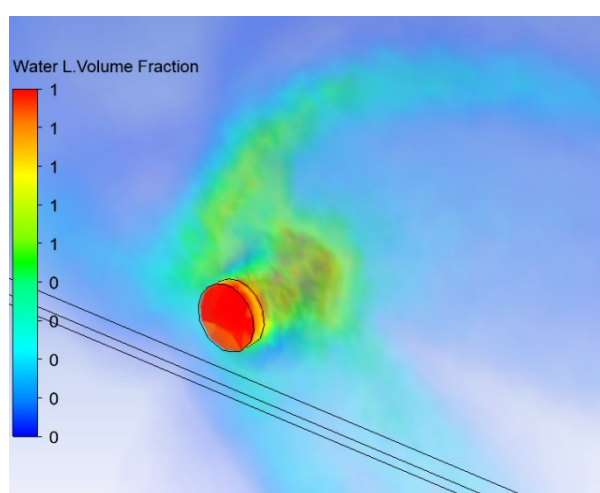
Obr. 5.22 představuje vykreslení rychlosti kapaliny, a částečně vzduchu, v prostředí. Porovnáním barevné škály na obr. 5.22 se stupnicí vidím, že nejvyšší rychlost dosahuje kapalina v bezprostřední blízkosti kotouče. Odstříkující kapalina dosahuje rychlosti podstatně nižší. Na rozdíl od obr. 5.22, který představuje vykreslení rychlosti kapaliny a vzduchu, obr. 5.23 představuje trajektorii pouze kapaliny bez vzduchu.



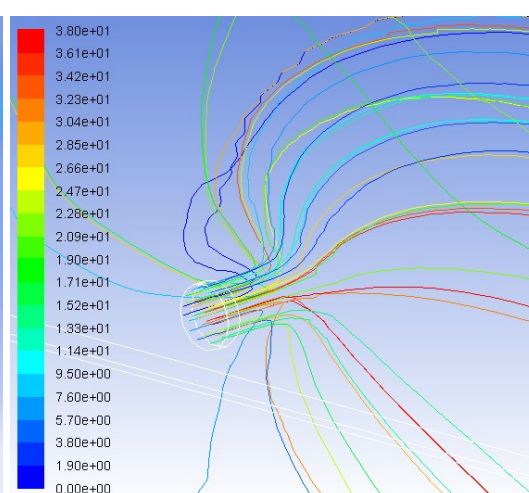
obr. 5.22 Volume rendering odklonění



obr. 5.23 Pathlines kapaliny



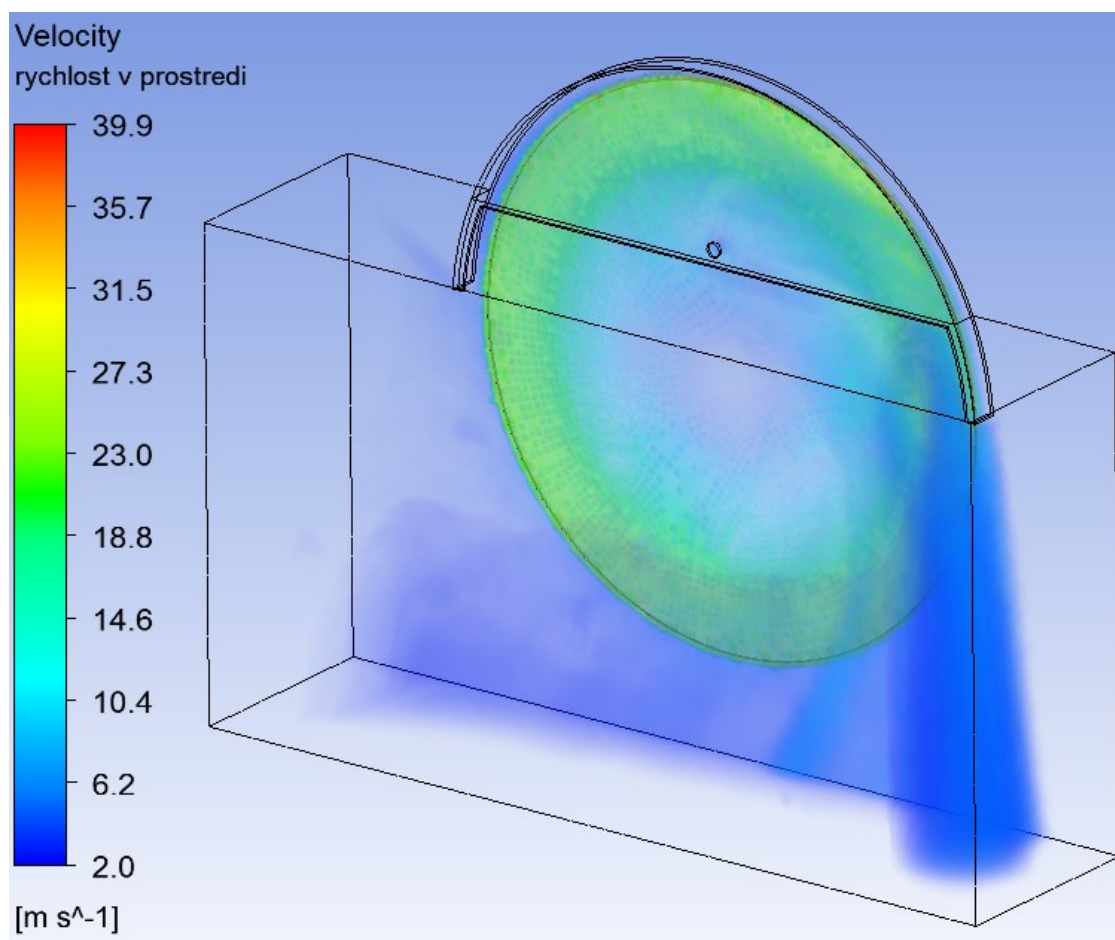
obr. 5.24 Volume rendering



obr. 5.25 Pathlines

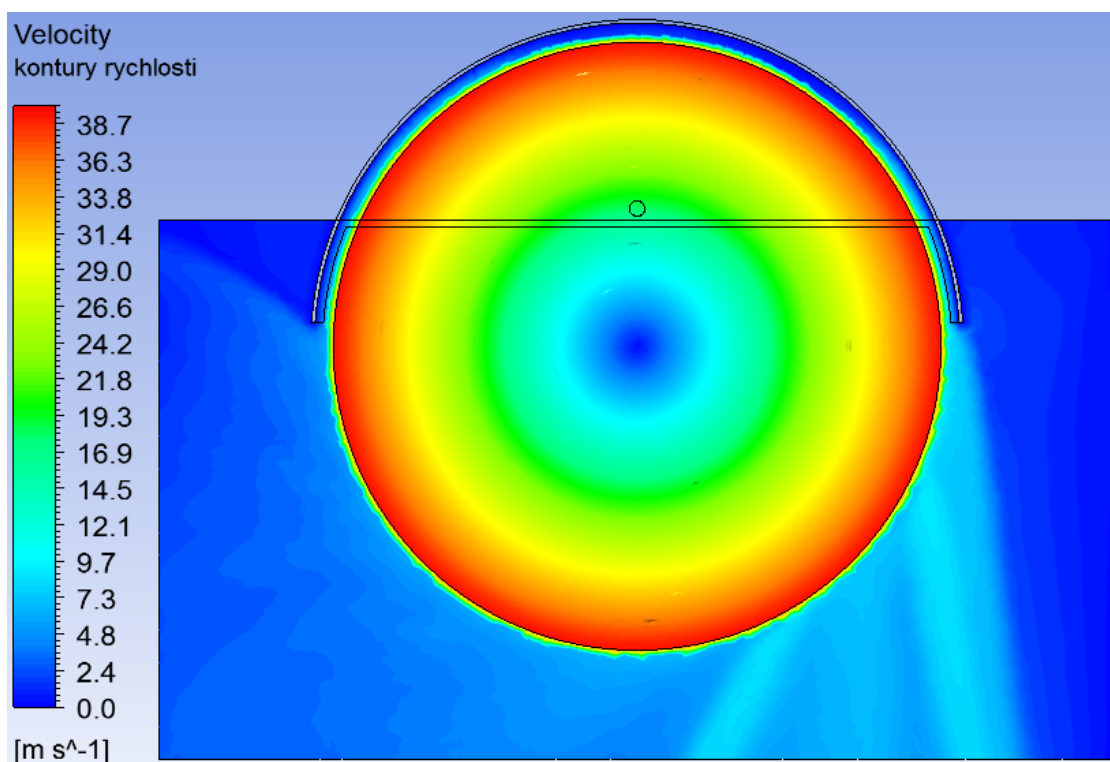
Obr. 5.24 a 5.25 představují detailní pohled na inlet. Jelikož kapalina dopadá na kotouč v téměř kolmém směru, rozleje se do všech stran. Vlivem tření a rotace kotouče se kapalina začne pohybovat ve směru rotace kotouče. Strhávání kapaliny vlivem rotace je znázorněno na obr. 5.25. Vedle, na obr. 5.24 je vykresleno objemové množství kapaliny, rozlévající se po kotouči. Největší koncentrace kapaliny je hned po výstupu z krytu. Následně je strháváno proudem již rotující kapaliny.

Pro lepší znázornění průběhu odstřiku kapaliny jsem přidal obr. 5.26. Zde můžeme vidět, že kapalina rotující na disku dosahuje přibližně poloviny rychlosti otáčení kotouče.



obr. 5.26 *Izometrický pohled*

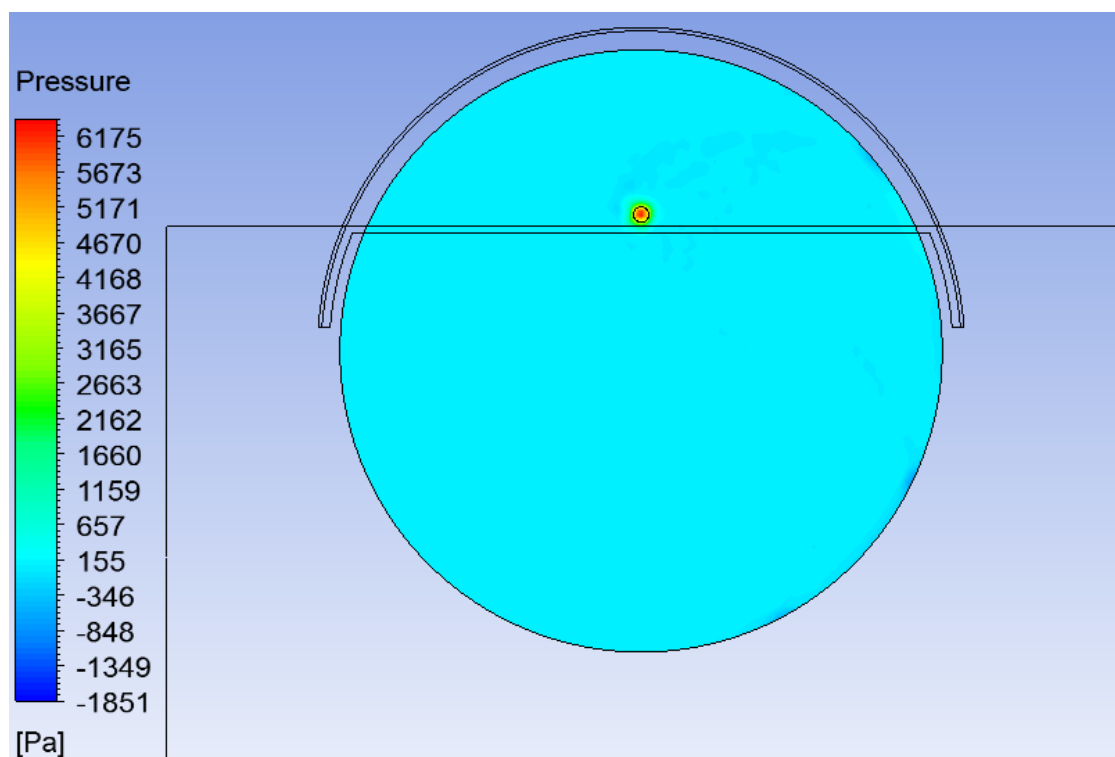
Rychlosti na obr. 5.27 jsem vykreslil v rovině, která je souběžná s plochou disku. Zde je také dobře vidět, že kapalina a vzduch dosahují velkých rychlostí pouze v blízkosti kotouče. Rozdíl můžeme vidět při přechodu z tmavě červené plochy kotouče, na zelenou až světle žlutou tenkou vrstvu v okolí.



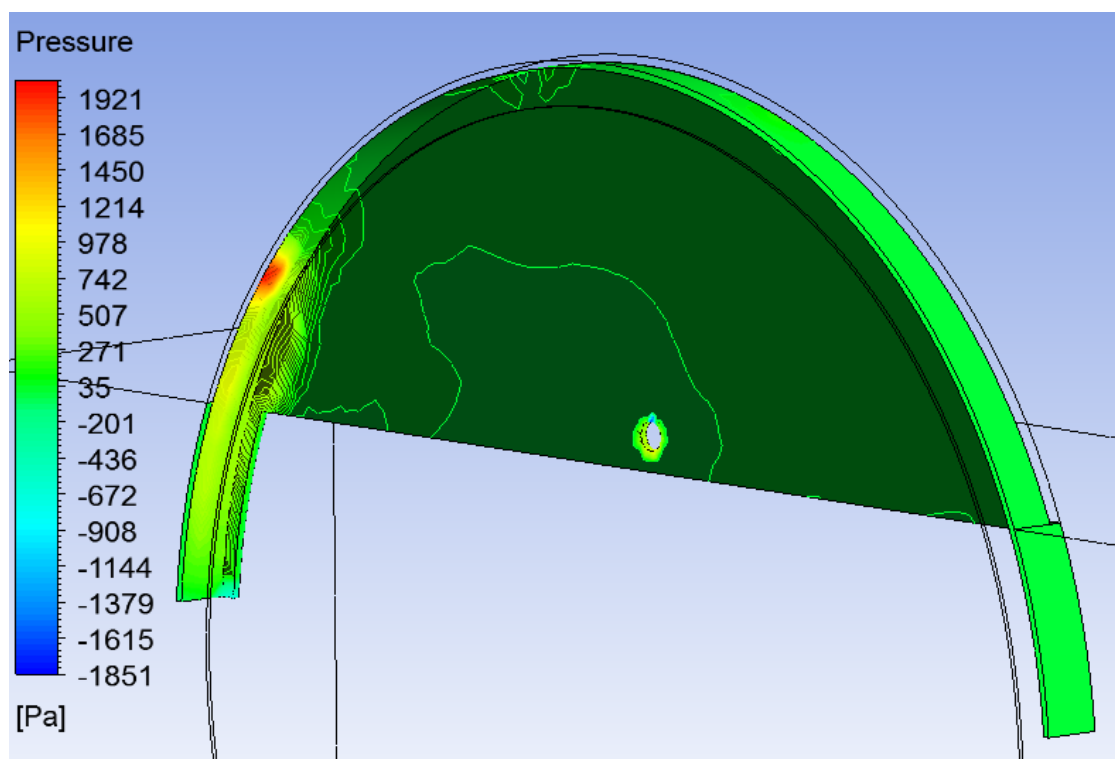
obr. 5.27 Kontury rychlosti vykreslené na rovině

Vyhodnocení tlaků je na obr. 5.28 a 5.29. Největší tlak působí v místě dopadu proudu kapaliny na kotouč. Beru v úvahu pouze tlak vyvozený kapalinou a rotací kotouče. Místy na kotouči vzniká i malý podtlak. Lze ho zaznamenat především na pravé spodní straně kotouče. Ten pravděpodobně vzniká při odtržení proudu vody.

Tlak na kryt vyvozený kapalinou je naprosto zanedbatelný. Vzniká v místě dopadu proudu kapaliny vlivem rotace kotouče. I na krytu vzniká minimální podtlak. Můžeme ho vidět na konci krytu. Pravděpodobně také vzniká odtržením proudu kapaliny od krytu.



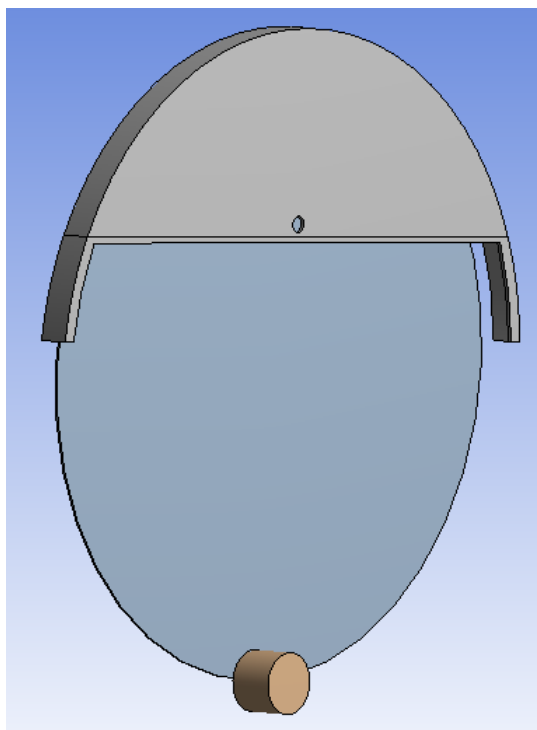
obr. 5.28 *Tlak na kotouči*



obr. 5.29 *Tlak na krytu*

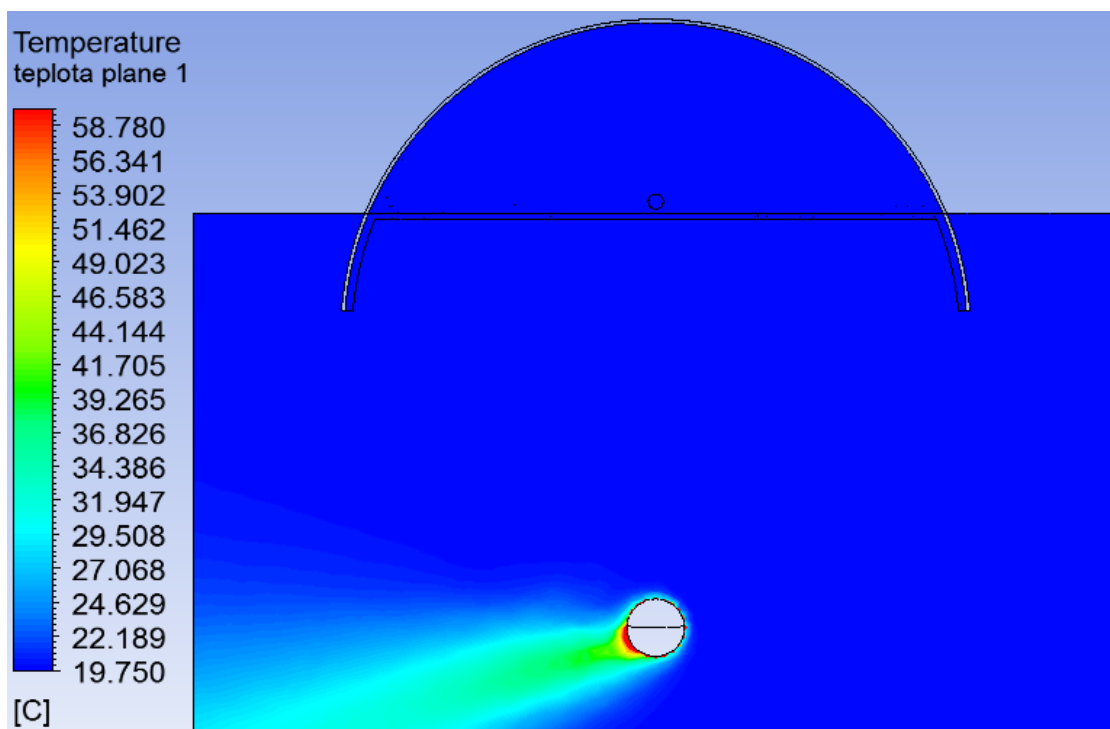
6 Modelování jednofázového proudění s přestupem tepla

Abych simuloval zahřátí kotouče, přidal jsem do geometrie váleček, představující řezaný vzorek. Ze snímání teplotního pole termokamerou bylo zřejmé, že k ohřátí řezacího kotouče dochází v místě kontaktu s řezaným materiálem. Váleček jsem umístil do bezprostřední blízkosti kotouče. Mezi kotoučem a válečkem byla mezera o velikosti 0,25 mm. Do matematického modelu jsem přidal rovnici energie. To vyžadovalo zadání okrajových podmínek na hranicích oblasti. Využil jsem podmínek ve formě teploty. Která byla zadána na vstupu a výstupu z oblasti (inlet a outlet) ve výši 300K. Počáteční teplota prostředí byla definovaná ve stejné hodnotě příkazem Patch a teplota v objemu válečku byla zadána variantě 600, 800 a 1000 K. Numerické výpočty probíhaly jako časově závislé, bylo vyhodnocováno teplotní pole v závislosti na teplotě řezaného vzorku a čase.

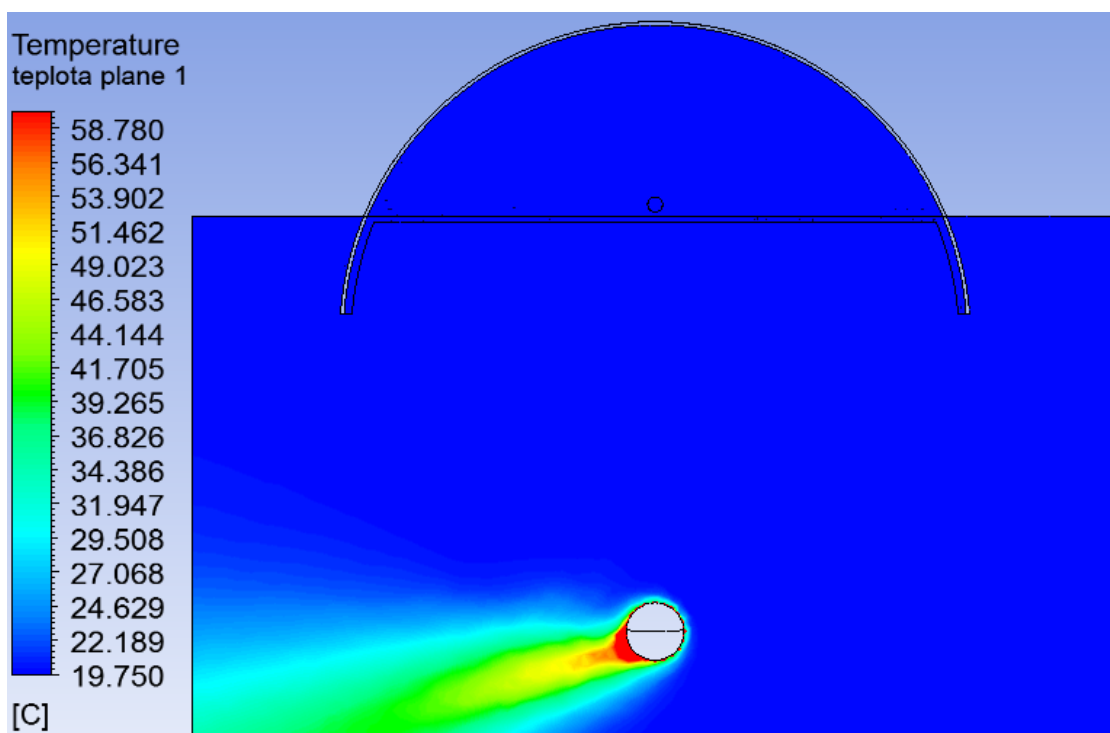


obr. 6.1 Geometrie s válečkem

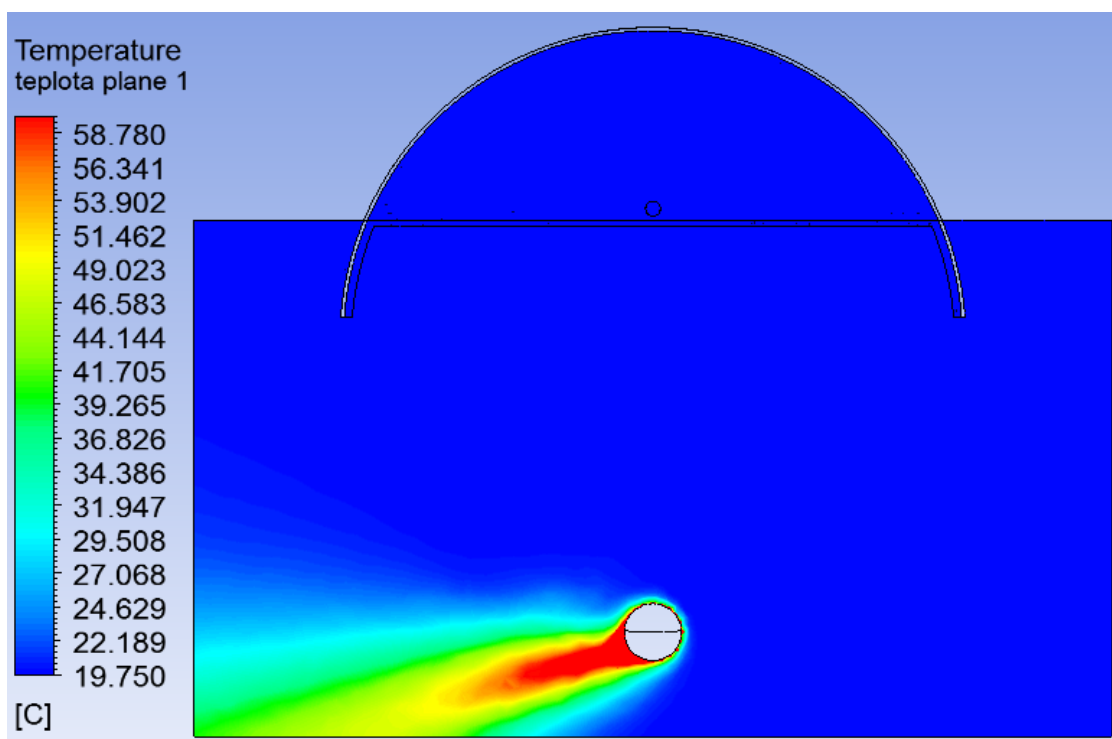
6.1 Zahřívání kotouče bez chlazení kapalinou, vyhodnoceno v čase 2,6s pro různou teplotu válečku



obr. 6.2 Šíření teploty v prostředí, teplota válečku 600K



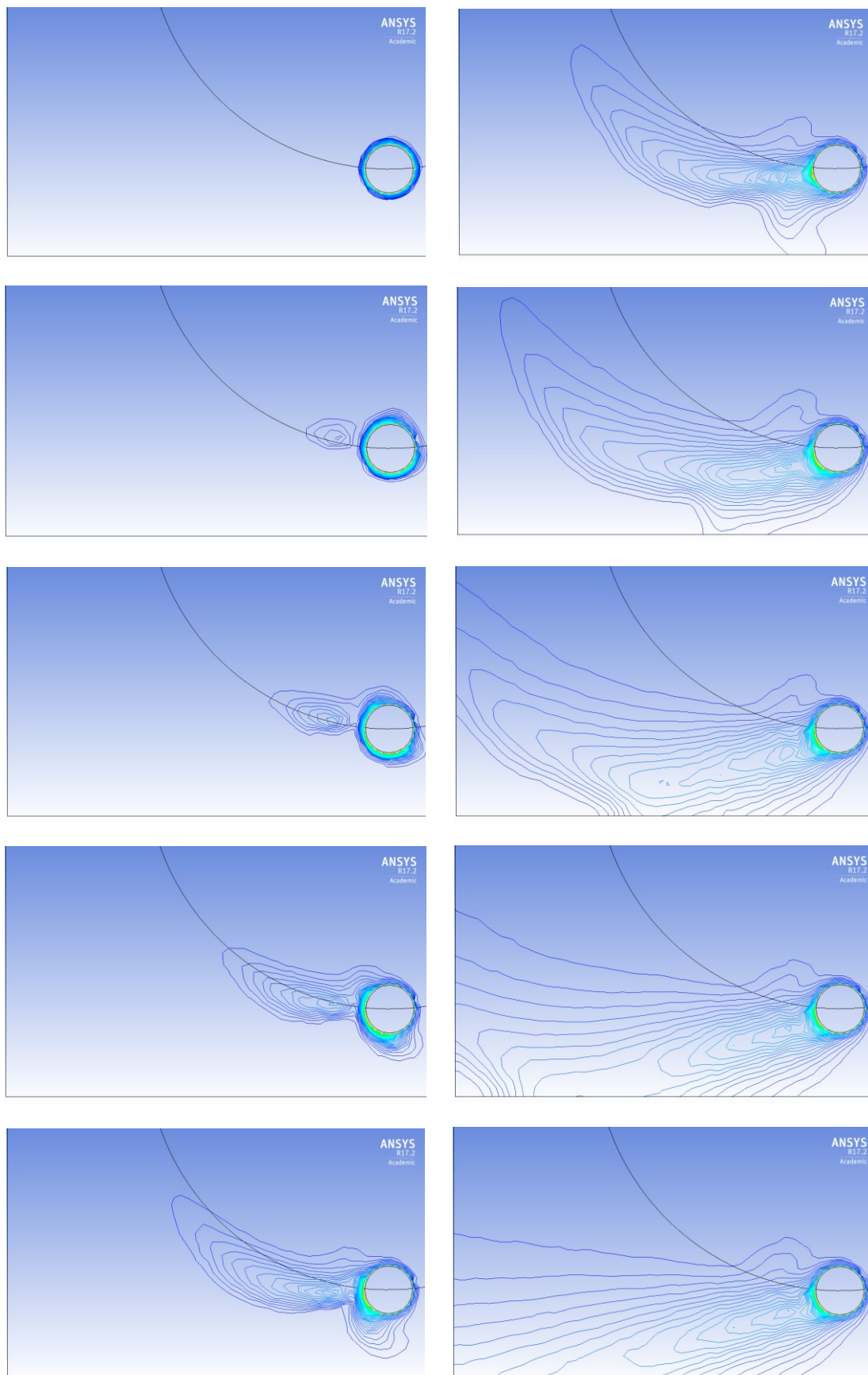
obr. 6.3 Šíření teploty v prostředí, teplota válečku 800K



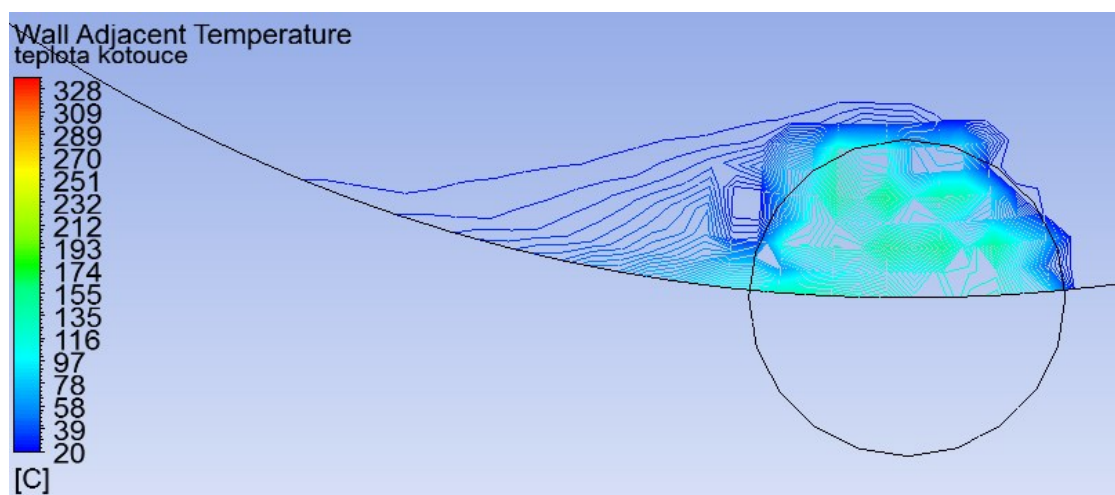
obr. 6.4 Šíření teploty v prostředí, teplota válečku 1000K

Výše uvedené grafické vyhodnocení (viz obr. 6.2, 6.3 a 6.4) znázorňují tepelný ohřev prostředí vzduchu od zahřátého válečku. Teplý vzduch je strháván proudem studeného vzduchu, který je vyvozený rotací kotouče. Obr. 6.5 představuje průběh šíření tepla v prostředí pro teplotu válečku 1000K.

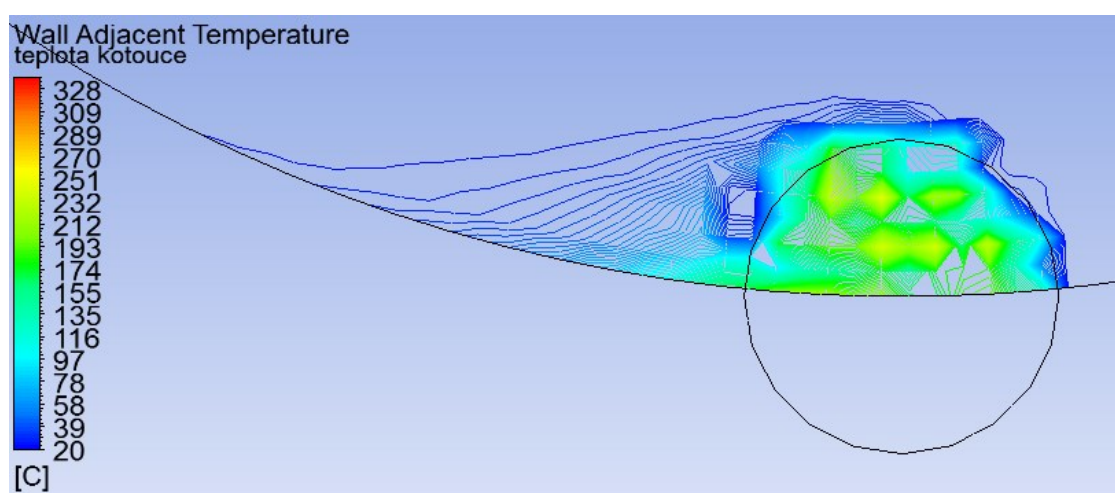
Následující grafické vyhodnocení 6.6 až 6.11 zobrazují zahřátí kotouče pro různé teploty 600K, 800K a 1000K. I přesto, že kotouč rotuje a není uvažováno jeho chlazení kapalinou, nedochází k prohřátí kotouče v celém obvodu kotouče, ale pouze v blízkosti zdroje tepla a kousek od něj ve směru rotace. Obr. 6.12 představuje průběh šíření tepla na ploše kotouče pro teplotu válečku 1000K.



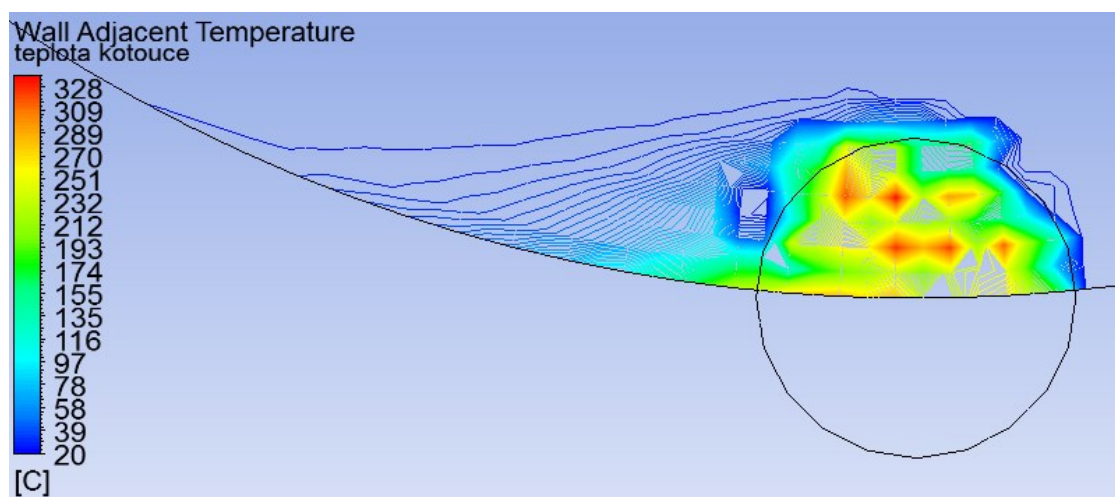
obr. 6.5 *Průběh šíření tepla v prostředí, teplota válečku 1000K*



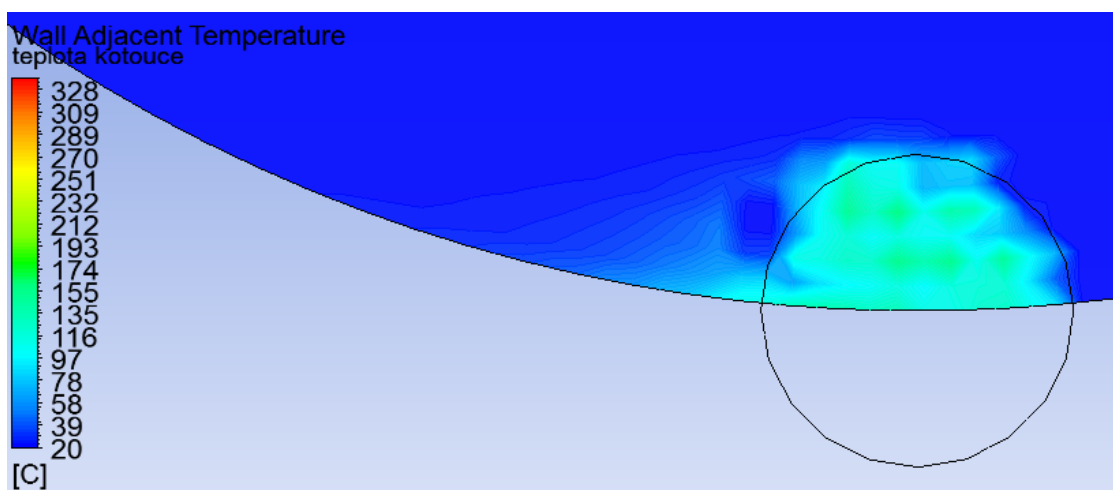
obr. 6.6 Šíření teploty na kotouči, teplota válečku 600K



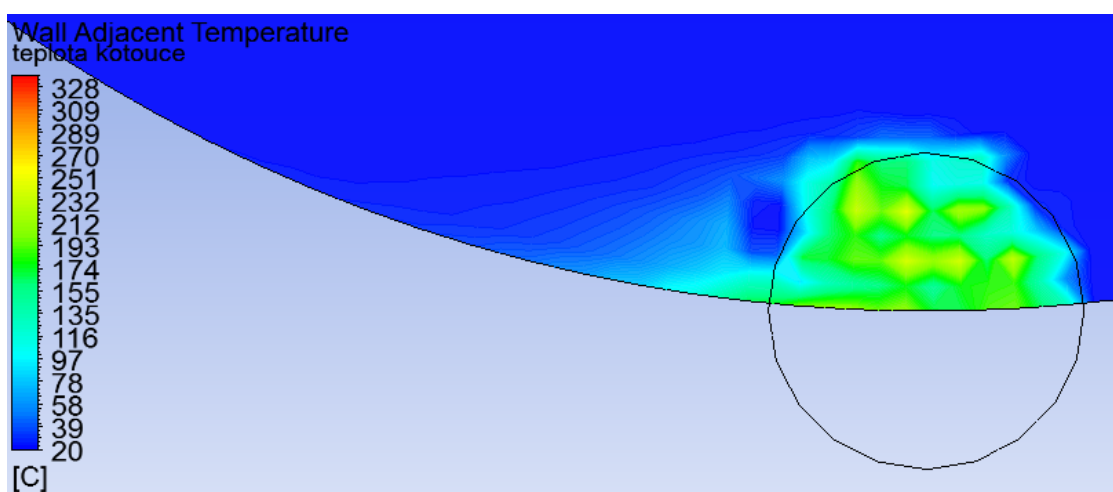
obr. 6.7 Šíření teploty na kotouči, teplota válečku 800K



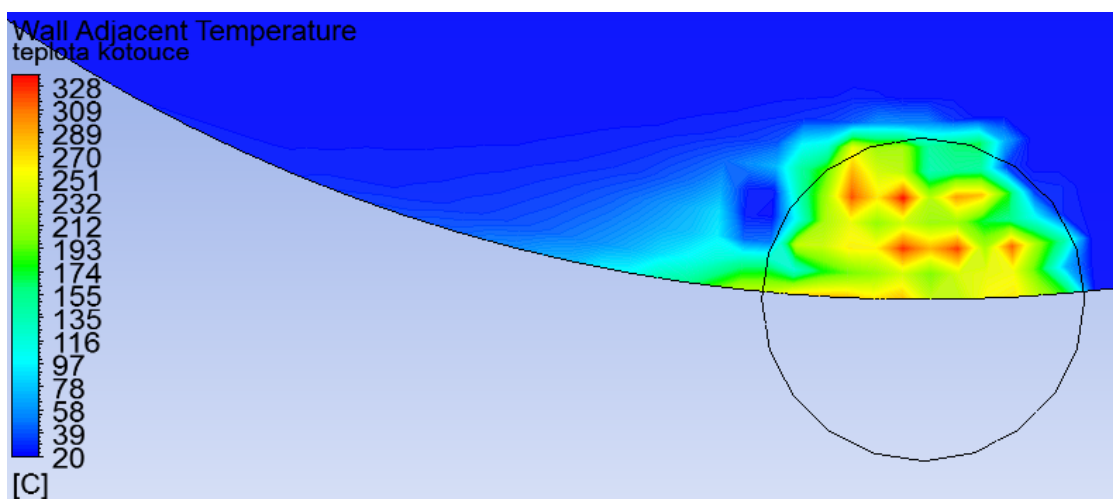
obr. 6.8 Šíření teploty na kotouči, teplota válečku 1000K



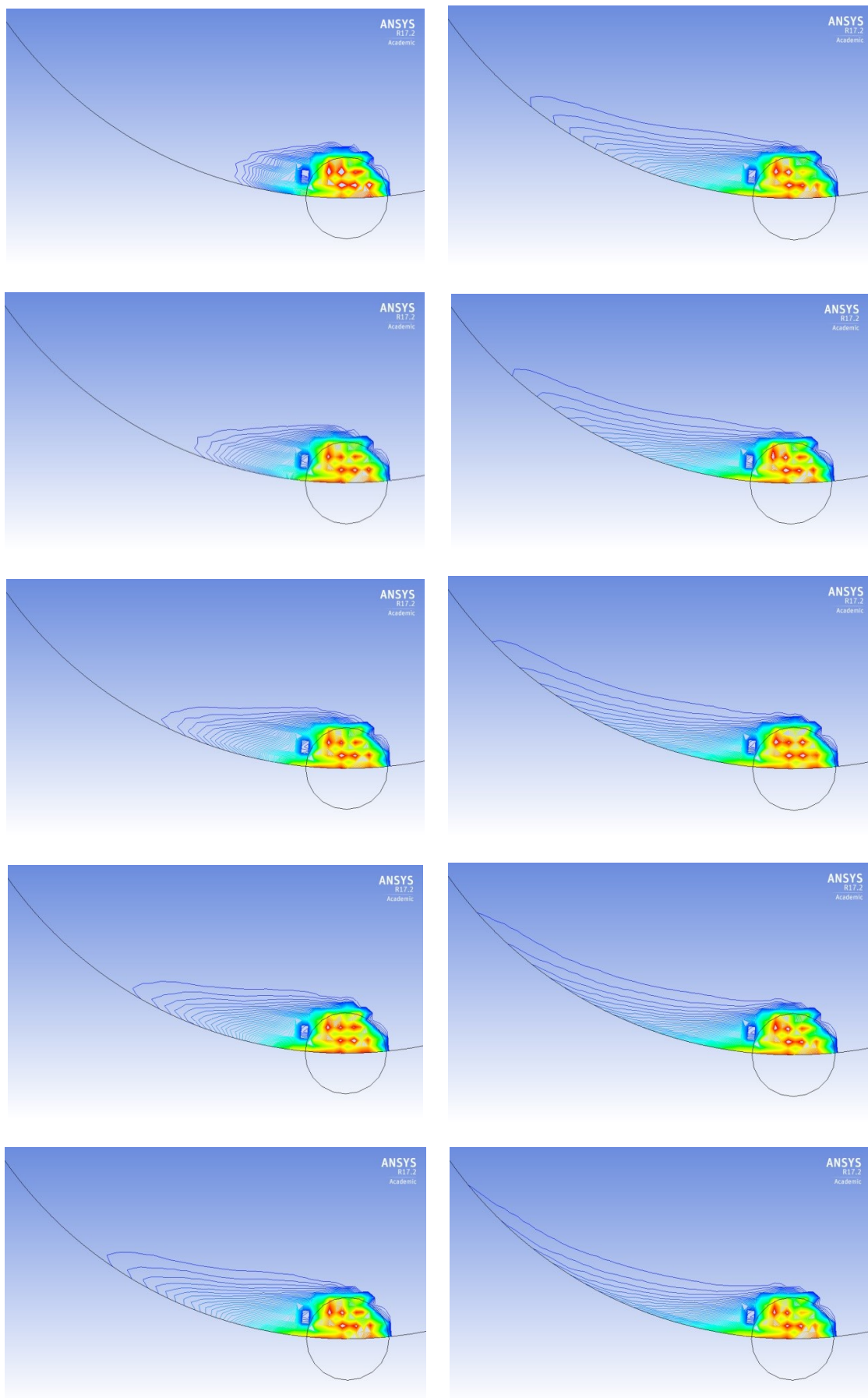
obr. 6.9 Šíření teploty na kotouči, teplota válečku 600K



obr. 6.10 Šíření teploty na kotouči, teplota válečku 800K



obr. 6.11 Šíření teploty na kotouči, teplota válečku 1000K



obr. 6.12 *Průběh šíření tepla na kotouči, teplota válečku 1000K*

6.2 Zahřívání kotouče s chladicí kapalinou, vyhodnoceno v čase 2,6s pro různou teplotu válečku

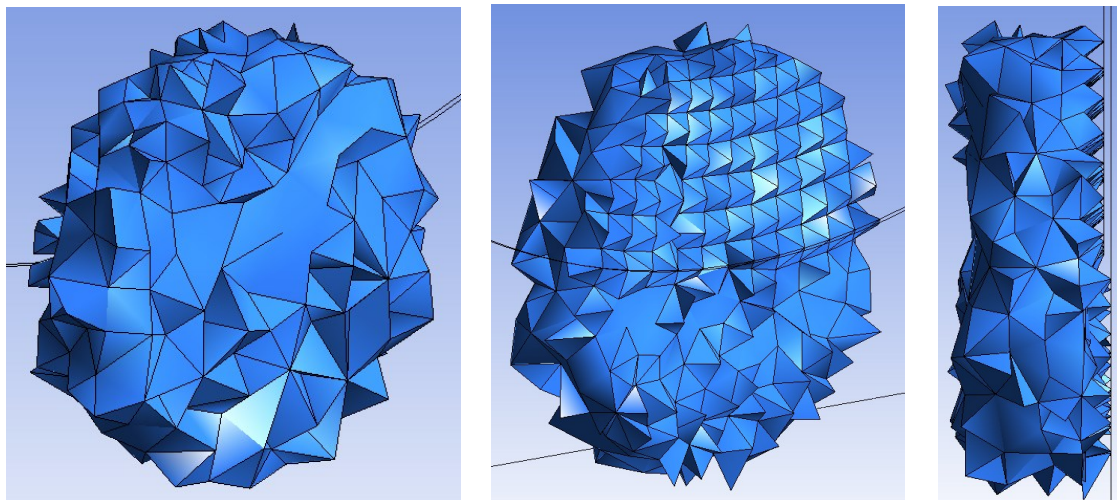
Pro simulaci přenosu tepla při použití vícefázového proudění jsem použil původní geometrii z modelu pro výpočet VoF popsáný v kapitole 5.1. Jako zdroj tepla jsem použil výběr oblasti buněk, které jsem následně odseparoval z vybraného prostředí a nastavil jako ocel. Tímto způsobem nedošlo ke změně sítě. Jelikož vybranou oblast tvoří geometrie sítě, tvar není přesně válcový. Parametry se proto neshodují s válečkem z předchozí úlohy 6.1. Geometrie je znázorněna na obr. 6.15.

Total Volume (m3)	
interior-prostredi:027	0.00019555713
Net	0.00019555713
Total Mass (kg)	
interior-prostredi:027	1.5703238
Net	1.5703238
mixture	
Total Volume Integral	
Total Energy (j/kg) (m3)	
interior-prostredi:027	68.966273
Net	68.966273
mixture	
Volume-Weighted Average	
Total Energy (j/kg)	
interior-prostredi:027	352665.6
Net	352665.6

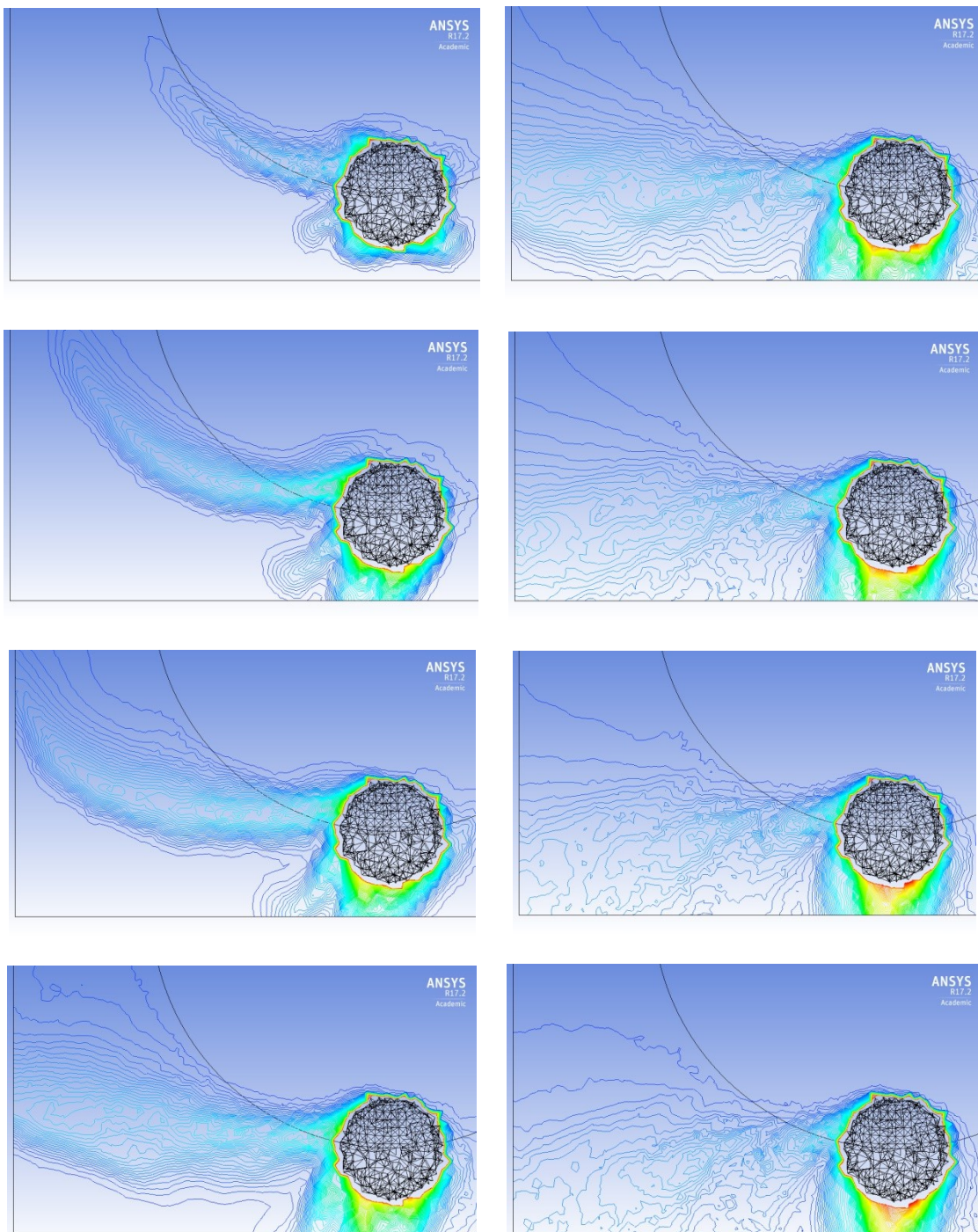
obr. 6.13 Report separované oblasti

Total Volume (m3)	
interior-valec	7.3390261e-05
Net	7.3390261e-05
Total Mass (kg)	
interior-valec	0.5893238
Net	0.5893238
Total Volume Integral	
Total Energy (j/kg) (m3)	
interior-valec	25.88222
Net	25.88222
Volume-Weighted Average	
Total Energy (j/kg)	
interior-valec	352665.6
Net	352665.6

obr. 6.14 Report válečku



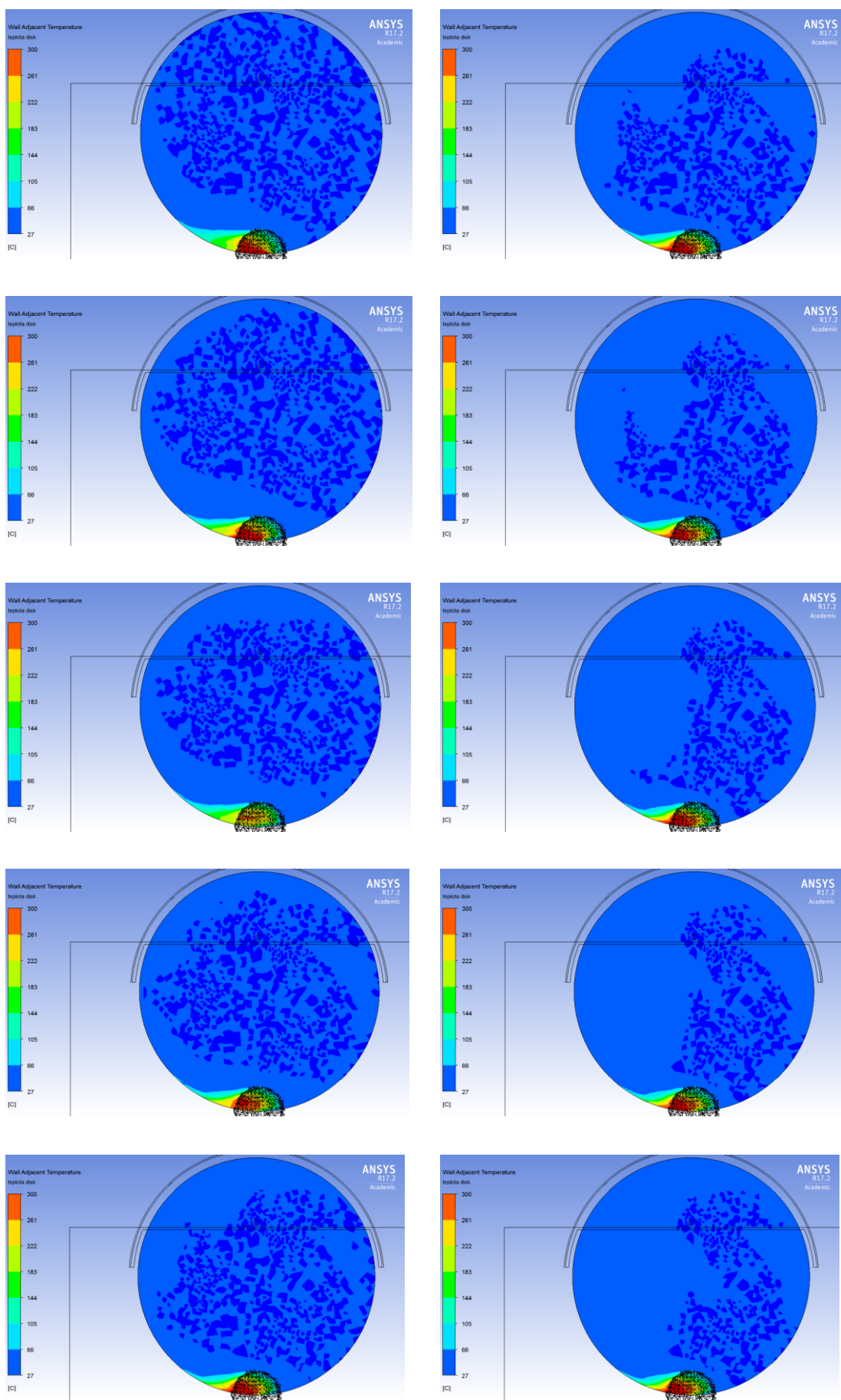
obr. 6.15 Odseparovaná oblast buněk



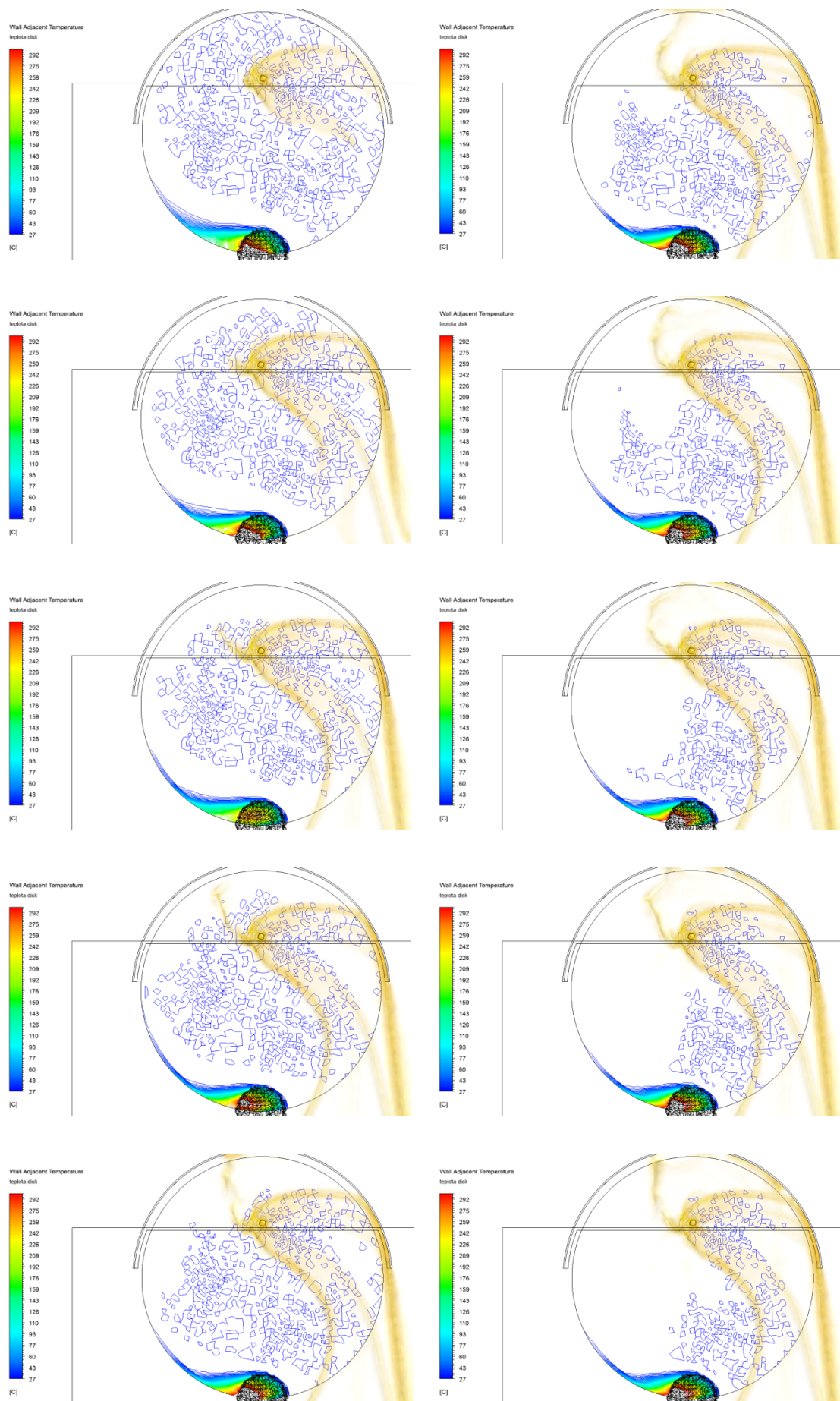
obr. 6.16 *Průběh šíření tepla v prostředí, teplota zdroje 1000K*

Výsledný průběh proudění ohřátého vzduchu se od obr. 6.5 liší. Je to zapříčiněno jak geometrií modelu, tak proudem kapaliny, který dopadá na vybranou oblast buňek.

Kotouč se v průběhu řezání zahřívá a ochlazuje. Lze to vidět na obr. 6.17 a 6.18. Na obr. 6.17 lze vidět, že kotouč je ze začátku studený (tmavé skvrny). Postupným otáčením se kotouče na okraji ve směru otáčení, začne zahřívát (světle modrá barva). Po nějaké době dojde k ustálení teploty a kotouč je ochlazován jen v místě proudu kapaliny. Průběh teploty s proudem kapaliny jsem vyobrazil na obr. 6.17. Pro lepší orientaci jsem kapalinu zobrazil žlutou barvou.



obr. 6.17 Průběh šíření tepla na kotouči, teplota zdroje 1000K



obr. 6.18 Průběh šíření tepla na kotouči s proudem kapaliny, teplota zdroje 1000K

7 Závěr

Téma této diplomové práce bylo vyšetřování proudových polí při výtoku z trysky na rotující kotouč. Původním záměrem bylo zmapovat a zaznamenat průběh oteplování rozbrušovacího kotouče termokamerou při řezání vzorku a simulací v programu ANSYS Fluent se tomuto průběhu co nejvíce přiblížit. Měření proběhlo ve firmě Struers na stroji Magnutom-500. Měření se podařilo zaznamenat zvyšující se teplotu v místě kontaktu řezného kotouče a děleného vzorku. Měření teploty značně komplikovalo velké množství odstříkující chladicí kapaliny od kotouče a krytu kotouče. Naměřená teplota řezného kotouče se mimo oblast řezu v průběhu řezání neměnila. To mohlo být z důvodu dostatečného chlazení kotouče nebo nepřesnosti měření v důsledku vrstvy kapaliny na kotouči.

Prvním krokem simulace bylo jednofázové proudění ve zjednodušené výpočetní oblasti. Předmětem bylo vyšetření rychlostního a tlakového pole kolem kotouče rotujícího v uzavřené válcové oblasti zaplněné vodou. V průběhu numerických výpočtů docházelo ke zpětnému proudění, proto jsem pravděpodobně nedosáhl splnění rovnice kontinuity, i když rozdíl vtékající a vytékající kapaliny byl minimální. Vektory rychlosti kapaliny dosahovaly maximální rychlosti cca $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a to v bezprostřední blízkosti rotace kotouče. Maximální úhlovou rychlost kotouče jsem ověřil jak numericky, tak graficky. Vyhodnotil jsem průběh tlaku na krytu. Tlak odpovídal tlaku kapaliny v rotujícím válcové nádobě.

V dalším kroku jsem se zabýval dvoufázovým prouděním v rozšířené výpočetní oblasti bez přestupu tepla. K simulaci vícefázového proudění jsem použil VoF výpočetní model. Proud chladicí kapaliny vystupující z trysky se rozlévá po stěně kotouče. Rotace kotouče strhává kapalinu ve směru rotace. Kryt kotouče usměrňuje odstřík kapaliny. Porovnal jsem vizuálně odstřík kapaliny při měření zachycený na fotografii s výsledkem simulací. Jak v axiálním tak i v radiálním směru se odstřík kapaliny relativně shoduje. Tlaky vyvozené kapalinou na kotouč a kryt jsou zanedbatelné.

Abych simuloval zahřátí kotouče, přidal jsem do geometrie váleček, představující řezaný vzorek. Přidáním válečku do prostředí se změnila geometrie sítě. Problém představovala malá mezera mezi kotoučem a válečkem. VoF simulace s přestupem tepla byla nestabilní. Simuloval jsem proto jen přenos tepla do prostředí a na kotouč bez chlazení kapalinou. Porovnal jsem průběhy pro teploty 600K, 800K, 1000K. Simulace VoF s přenosem tepla se mi podařila až při nezasahování do původní geometrie odladěného VoF modelu bez přestupu tepla. Jako zdroj tepla jsem použil odseparovanou část sítě, pomocí registru, kterou jsem nastavil jako ocel s teplotou.

Tímto způsobem se mi podařilo simulovat zahřívání kotouče a jeho chlazení vlivem proudu kapaliny.

Simulace chlazení kotouče je velice obsáhlé a složité téma. Nepodařilo se mi přesně simulovat měření, jelikož do něj vstupuje spousta proměnných. Podařilo se mi ale přiblížit a nastínit jeden z možných způsobů řešení této problematiky.

8 Použitá literatura

[1] BOJKO, Marian. *3D proudění - Ansys fluent: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2607-3. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>.

[2] BOJKO, Marian. *"Modelování proudění" FLUENT: návody do cvičení* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-80-248-1909-9. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

[3] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1913-6.. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

[4] KOZUBKOVÁ, Milada, Tomáš BLEJCHAŘ a Marian BOJKO. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti: učební text*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2491-8. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

[5] KOZUBKOVÁ, Milada, Marian BOJKO. *Modelování přestupu tepla ve výměníku – návod*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

[6] HÍŘEŠ, Ondrej, HATALA, Michal, HLOCH, Sergerj. *DELENIE KOVOVÝCH MATERIÁLŮ OKRUŽNOU PÍLOU, VODNÝM PRÚDOM A PLAZMOVÝM OBLÚKOM*. 1. vydání. Jiří Pustina, Ostrava – Poruba, Česká republika, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6

[7] *ANSYS Fluent Tutorial Guide* [online]. 16. 2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.pdfdrive.net/ansys-fluent-theory-guidepdf-portal-de-documentacion-de-d13165617.html>

[8] *ANSYS Fluent User's Guide* [online]. Release 15.0. 2013, 2692 s. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>

[9] Obrazový materiál čerpaný z webových stránek <http://www.struers.com/> Dostupný online na WWW: <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Knowledge/Cutting/Abrasive-wet-cutting-1600x730-px.jpg?h=730&la=en-GB&w=1600&hash=8AB51D078706A1529C0B0433A051FE0DDDB2AB5E>

[10] Obrazový materiál čerpaný z webových stránek <http://www.struers.com/> Dostupný online na WWW: <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Knowledge/Cutting/Clamp-below-front-part-of-wheel-974x1400-px.jpg?h=1400&la=en-GB&w=974&hash=C8AE1800477815DD991521B850A3EDADB7599B1F>

[11] Obrazový materiál čerpaný z webových stránek <http://www.struers.com/> Dostupný online na WWW: <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Products/Cutting/Equipment/Magnutom/Magnutom-Front-open-doors--1024x665-px.jpg?h=665&la=en-GB&w=1024&hash=261B9A8A4063B30F8E02E9CDA596DD6F825E90F9>

[12] Obrazový materiál čerpaný z webových stránek <http://www.struers.com/> Dostupný online na WWW: <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Products/Cutting/Equipment/Magnutom/Magnutom-Customer-1024x665-px.jpg?h=665&la=en-GB&w=1024&hash=E87AA748E2594DEE6757C63B983A1E5416B99BF6>

[14] Obrazový materiál čerpaný z webových stránek <http://www.struers.com/> Dostupný online na WWW: <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Products/Cutting/Equipment/Magnutom/Magnutom-Product-Features-M30/Magnutom-AxioWash-1024x759-px.jpg>

[15] Obrazový materiál čerpaný z webových stránek <http://www.struers.com/> Dostupný online na WWW: <http://cdnstruersproduction.azureedge.net/-/media/Struers-media-library/Products/Cutting/Cutting-accessories/Cooling/Cooling-1600x730-px.jpg?h=730&la=en-GB&w=1600&hash=E30B660B719376241003A48466EFC2FD9F23592>

[16] *CFD Fluent tutorial - Ink Jet drop formation | VOF model.* *Www.youtube.com* [online]. 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=M2rPRX3TooY&index=20&list=PLbpfw4fR56bOOe66QwctUTndm9MJgpxnO&t=112s>

[17] *CFD Tutorial - Axial Fan simulation | ANSYS Fluent.* *Www.youtube.com* [online]. 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=KFrZoDWUC5s&list=PLbpfw4fR56bOOe66QwctUTndm9MJgpxnO&index=18>

[18] *Open up to high capacity cutting – unleash your cutting power 24/7.* Denmark, 2015.